

# Sumari

<b>SUMARI</b>	<b>1</b>
<b>ANEXO A. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL COLECTOR DE GASES DE ESCAPE</b>	<b>3</b>
A.1 Cálculo de las reacciones de combustión	4
A.2 Cálculo de los Diámetros Nominales	11
A.3 Cálculo de la altura de la chimenea	13
A.3.1 Datos climatológicos Ascó	14
A.3.2 Cálculo de inmisión	17
A.3.3 Resultados	24
A.4 Cálculo de la Pérdida de Carga	28
A.5 Cálculo de la Presión Máxima en el colector	47
A.6 Cálculo de espesores	52
A.7 Cálculo del aislamiento del colector	55
A.7.1 Cálculo de los espesores del aislamiento	55
A.7.2 Cálculo de la Caída de Temperatura	66
A.8 Cálculo de dilataciones	74
A.9 Cálculo de los soportes	76
A.9.1 Soportes del tramo motor	76
A.9.2 Soportes del tramo colector general	80
A.10 Cálculo de resistencia del colector	85
A.11 Cálculo de los acoplamientos más solicitados	92
A.11.1 Cálculo del acoplamiento J.E. DN1300(2) – Codo	92
A.11.2 Cálculo del acoplamiento DIVÉRTER DN500 – Chimenea individual motor	100
A.11.3 Cálculo del acoplamiento entre la CONEXIÓN ECONOMIZADOR/CHIMENEA – Chimenea Caldera	106
<b>ANEXO B. NORMAS Y REGLAMENTACIÓN</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO C. ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS</b>	<b>114</b>
C.1 Especificación de los Motores de cogeneración	114
C.2 Especificación de la Caldera de vapor	116
C.3 Especificación del Economizador	118
<b>ANEXO D. CÁLCULO ESTUDIO ECONÓMICO</b>	<b>120</b>
D.1 Presupuesto del ciclo de cola	121
D.2 Estudio económico del ciclo de cola	124



**ANEXO E. PLANING DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PUESTA EN  
MARCHA DEL CICLO DE COLA\_\_\_\_\_129**



## **ANEXO A.CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL COLECTOR DE GASES DE ESCAPE**

En los apartados pertenecientes al presente anexo se detallarán los cálculos efectuados para el diseño del Colector de Gases de Escape, objeto del proyecto.

Los apartados se dividen y se ordenan en función del proceso seguido para su propio diseño, teniendo en cuenta los aspectos que prevalecen sobre otros, ya sea por su importancia o por su grado de detalle en el cálculo.

Los cálculos partirán de un trazado previo del colector impuesto por la estructura de la nave de motores (que se puede observar en el plano MNE-CGE-01), debido a que el colector de gases de escape es una aplicación secundaria de la planta industrial.



## A.1 Cálculo de las reacciones de combustión

Para el cálculo del caudal de los gases de escape es necesario el estudio de las reacciones de combustión que se producen en los motores, a partir del Gas de Síntesis.

Por lo tanto, partiendo de los datos de diseño, en lo que a la composición del Gas de Síntesis se refiere, se obtendrá el caudal de gases de escape que será utilizado para el diseño del colector. La composición y características del Gas de Síntesis a la entrada de los motores es la siguiente:

- Composición Gas de Síntesis (porcentaje en volumen base seca):

Gas/Vapor	%
H <sub>2</sub>	12,8 %
CO <sub>2</sub>	13,4 %
O <sub>2</sub>	0,2 %
N <sub>2</sub>	57,9 %
CO	4,3 %
CH <sub>4</sub>	10,4 %
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,0 %
Vapor agua	67 g/kg <sub>GS</sub>

(kg<sub>GS</sub>: kilogramos de Gas de Síntesis)

Tabla A.1 – Composición Gas de Síntesis

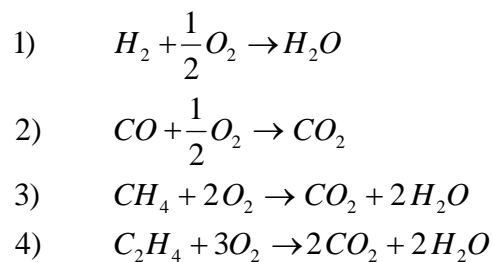
- Caudal Gas de Síntesis (Seco para los 6 motores): 16310 kg/h
- Caudal de agua: 1092,8 kg/h
- PCI materia prima (PCI): 29,57 J/kg
- Temperatura Gas de Síntesis: 50 °C



- Densidad Gas de Síntesis ( $\rho_{GS}$ , a  $T = 0^\circ\text{C}$ ;  $p = 1,013 \text{ bar}$ ):  $1,11 \text{ kg/m}^3$
- Exceso de aire de admisión del motor (s): 40% del est.

Con el fin de poder comparar los cálculos con posibles variaciones futuras de las condiciones del Gas de Síntesis a la entrada a motores, todos los datos se referencian a Condiciones Normales ( $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,013 \text{ bar}$ ). En estas condiciones se asume el comportamiento de Gas Ideal, en que  $1 \text{ kmol } X \Rightarrow 22,4 \text{ m}^3 X$ , siendo X el componente correspondiente del Gas de Síntesis.

Partiendo de la composición del Gas de Síntesis anterior se tiene que las reacciones que participan en la combustión son:



Como el porcentaje que muestra la composición del Gas de Síntesis es volumétrico, es necesario convertir las unidades de caudal másico a volumétrico. Por ello se utilizará:

$$A \left[ \frac{m^3}{h} \right] = Q_{GS} \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{1}{\rho_{GS}} \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Por lo tanto se puede calcular los caudales de los productos de las reacciones anteriores de la siguiente manera:

- Caudal  $CO_2$

Cantidad de  $CO_2$  procedente del Gas de Síntesis

$$\begin{aligned}
 Q_{CO_2(GS)} &= A \cdot (\% CO_2) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmol}{m^3} \right] \cdot PM_{CO_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] = \\
 &= 16310 \cdot \frac{1}{1,11} \cdot \frac{13,4}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 44 = 3867,59 \frac{kg}{h}
 \end{aligned}$$



Cantidad de CO<sub>2</sub> producida en la reacción 2) (1kmol CO<sub>2</sub> ⇌ 1kmol CO<sub>2</sub>)

$$Q_{CO_2(2)} = A \cdot (\%CO) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmol}{m^3} \right] \cdot PM_{CO_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$= 16310 \cdot \frac{1}{1,11} \cdot \frac{4,3}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 44 = 1241,09 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de CO<sub>2</sub> producida en la reacción 3) (1 kmol CH<sub>4</sub> ⇌ 1kmol CO<sub>2</sub>)

$$Q_{CO_2(3)} = A \cdot (\%CH_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolCH_4}{m^3} \right] \cdot PM_{CO_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$= 16310 \cdot \frac{1}{1,11} \cdot \frac{10,4}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 44 = 3001,71 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de CO<sub>2</sub> producida en la reacción 4) (1 kmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ⇌ 2 kmol CO<sub>2</sub>)

$$Q_{CO_2(4)} = A \cdot (\%C_2H_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolC_2H_4}{m^3} \right] \cdot 2 \left[ \frac{kmolCO_2}{kmolC_2H_4} \right] \cdot PM_{CO_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$= 16310 \cdot \frac{1}{1,11} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 2 \cdot 44 = 577,25 \frac{kg}{h}$$

Por lo tanto,

$$Q_{CO_2} = Q_{CO_2(GS)} + Q_{CO_2(2)} + Q_{CO_2(3)} + Q_{CO_2(4)} = 3867,59 + 1241,09 + 3001,71 + 577,25 =$$

$$= 8687,6 \frac{kg}{h}$$

- Caudal H<sub>2</sub>O

Cantidad de H<sub>2</sub>O procedente del Gas de Síntesis

$$Q_{H_2O(1)} = 16310 \frac{kg_{GS}}{h} \cdot 0,067 \frac{kg_{H_2O}}{kg_{GS}} = 1092,8 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de H<sub>2</sub>O producida en la reacción 1) (1kmol H<sub>2</sub> ⇌ 1kmol H<sub>2</sub>O)

$$Q_{H_2O(1)} = A \cdot (\%H_2) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmol}{m^3} \right] \cdot PM_{H_2O} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$



$$= 16310 \cdot \frac{12,8}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 18 = 1511,35 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de H<sub>2</sub>O producida en la reacción 3) (1kmol CH<sub>4</sub> ⇌ 2kmol H<sub>2</sub>O)

$$\begin{aligned} Q_{H_2O(3)} &= A \cdot (\%CH_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolCH_4}{m^3} \right] \cdot 2 \left[ \frac{kmolH_2O}{kmolCH_4} \right] \cdot PM_{H_2O} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] = \\ &= 16310 \cdot \frac{10,4}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 2 \cdot 18 = 2455,95 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Cantidad de H<sub>2</sub>O producida en la reacción 4) (1kmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ⇌ 2kmol H<sub>2</sub>O)

$$\begin{aligned} Q_{H_2O(4)} &= A \cdot (\%C_2H_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolC_2H_4}{m^3} \right] \cdot 2 \left[ \frac{kmolH_2O}{kmolC_2H_4} \right] \cdot PM_{H_2O} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] = \\ &= 16310 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 2 \cdot 18 = 236,15 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} Q_{H_2O} &= Q_{H_2O(GS)} + Q_{H_2O(1)} + Q_{H_2O(3)} + Q_{H_2O(4)} = 1092,8 + 1511,35 + 2455,95 + 236,15 = \\ &= 5296,25 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

- Caudal O<sub>2</sub>

Se calculará en primer lugar el oxígeno estequiométrico necesario.

Cantidad de O<sub>2</sub> procedente del Gas de Síntesis

$$\begin{aligned} Q_{O_2(GS)} &= A \cdot (\%O_2) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmol}{m^3} \right] \cdot PM_{O_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] = \\ &= 16310 \cdot \frac{0,2}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 32 = 41,98 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Cantidad de O<sub>2</sub> necesaria en la reacción 1) (1 kmol H<sub>2</sub> ⇌ 1/2 kmol O<sub>2</sub>)

$$Q_{O_2(1)} = A \cdot (\%H_2) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolH_2}{m^3} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{kmolO_2}{kmolH_2} \right] \cdot PM_{O_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$



$$= 16310 \cdot \frac{12,8}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 1343,42 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de O<sub>2</sub> necesaria en la reacción 2) (1 kmol CO  $\Leftrightarrow$  1/2 kmol O<sub>2</sub>)

$$Q_{O_2(2)} = A \cdot (\%CO) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolCO}{m^3} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{kmolO_2}{kmolCO} \right] \cdot PM_{O_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$= 16310 \cdot \frac{4,3}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot \frac{1}{2} \cdot 32 = 451,31 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de O<sub>2</sub> necesaria en la reacción 3) (1 kmol CH<sub>4</sub>  $\Leftrightarrow$  1/2 kmol O<sub>2</sub>)

$$Q_{O_2(3)} = A \cdot (\%CH_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolCH_4}{m^3} \right] \cdot 2 \left[ \frac{kmolO_2}{kmolCH_4} \right] \cdot PM_{O_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$= 16310 \cdot \frac{10,4}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 2 \cdot 32 = 4366,13 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de O<sub>2</sub> necesaria en la reacción 4) (1 kmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>  $\Leftrightarrow$  3 kmol O<sub>2</sub>)

$$Q_{O_2(4)} = A \cdot (\%C_2H_4) \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{22,4} \left[ \frac{kmolCH_4}{m^3} \right] \cdot 3 \left[ \frac{kmolO_2}{kmolCH_4} \right] \cdot PM_{O_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] =$$

$$16310 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 3 \cdot 32 = 629,73 \frac{kg}{h}$$

Por lo tanto,

$$Q_{O_2(esteq.)} = Q_{O_2(1)} + Q_{O_2(2)} + Q_{O_2(3)} + Q_{O_2(4)} - Q_{O_2(GS)} =$$

$$= 1343,42 + 451,31 + 4366,13 + 629,73 - 41,98 = 6748,61 \frac{kg}{h}$$

Teniendo en cuenta que el caudal de oxígeno de los gases de escape viene a ser el exceso (40 %), y sabiendo que precisamente este exceso es el que va a los gases de escape (con una combustión correcta de los motores), se tiene:

$$Q_{O_2} = s \cdot Q_{O_2(esteq.)} = \frac{40}{100} \cdot 6748,61 = 2699,4 \frac{kg}{h}$$

Donde:





s = 0,4: Exceso de oxígeno del aire de admisión

- Caudal  $N_2$

El caudal de  $N_2$  de los gases de escape viene determinado por el oxígeno de admisión (1,4 veces el estequiométrico), teniendo en cuenta que la composición del aire en masa es 23 %  $O_2$ ; 77 %  $N_2$ ; y por la cantidad de  $N_2$  que lleva el Gas de Síntesis. Por lo tanto, se tiene:

$$Q_{aire} = (1 + 0,4) \cdot Q_{O_2(esteq.)} \cdot \frac{1}{0,23} = 1,4 \cdot 6748,61 \cdot \frac{1}{0,23} = 41078,49 \frac{kg}{h}$$

$$\begin{aligned} Q_{N_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] &= Q_{aire} \cdot 0,77 + A \cdot (\% N_2) \cdot \frac{1}{22,4} \cdot PM_{N_2} = \\ &= 41078,49 \cdot 0,77 + 16310 \cdot \frac{57,9}{100} \cdot \frac{1}{22,4} \cdot 28 = 42264,97 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Para el dimensionado del colector se requiere los caudales volumétricos reales, con lo que es necesario las densidades de los diferentes componentes a  $T = 463^\circ C$  y  $p = 1,07$  bar (como los proveedores de los motores dan 60 mbar de límite de caída de presión hasta atmósfera, se coge 1,07 bar de presión a la salida de motores como estimación).

Extrayendo dichas densidades de *Taules i gràfiques de propietats termodinàmiques* (ver referencia [2] de la bibliografía de la memoria) se obtiene:

$$\rho_{CO_2} = 0,7194 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow Q_{CO_2} = \frac{1}{\rho_{CO_2}} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \cdot Q_{CO_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{1}{0,7194} \cdot 8687,6 = 12075,8 \frac{m^3}{h}$$

$$\rho_{H_2O} = 3,33 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow Q_{H_2O} = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \cdot Q_{H_2O} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{1}{3,3333} \cdot 5296,25 = 1589,0 \frac{m^3}{h}$$

$$\rho_{O_2} = 0,5208 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow Q_{O_2} = \frac{1}{\rho_{O_2}} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \cdot Q_{O_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{1}{0,5208} \cdot 2699,4 = 5182,8 \frac{m^3}{h}$$

$$\rho_{N_2} = 0,4504 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow Q_{N_2} = \frac{1}{\rho_{N_2}} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \cdot Q_{N_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{1}{0,4504} \cdot 42265 = 93828,3 \frac{m^3}{h}$$



A modo de resumen de los cálculos realizados se puede observar la tabla A.1.2 :

CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>	
(kg/h)	(m <sup>3</sup> /h)	(kg/h)	(m <sup>3</sup> /h)	(kg/h)	(m <sup>3</sup> /h)	(kg/h)	(m <sup>3</sup> /h)
<b>8687,6</b>	<b>12075,8</b>	<b>5296,2</b>	<b>1589,0</b>	<b>2699,4</b>	<b>5182,9</b>	<b>42265,0</b>	<b>93828,3</b>

Tabla A.2 – Composición Gases de Escape

Sumando los caudales encontrados para cada componente a T = 463 °C se tiene el caudal de gases de escape total (dividiendo entre 6 se hallará el caudal correspondiente a cada motor):

$$\begin{aligned}
 Q_{GE} &= Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{O_2} + Q_{N_2} = 12075,8 + 1589,0 + 5182,9 + 93828,3 = \\
 &= 112676 \frac{m^3}{h} \\
 Q_{Mi} &= \frac{Q_{GE}}{6} = \frac{112676}{6} = 18779,3 \frac{m^3}{h} = 5,22 \frac{m^3}{s}
 \end{aligned}$$



## A.2 Cálculo de los Diámetros Nominales

Para el cálculo de los Diámetros Nominales de los diferentes tramos del colector de gases de escape, se ha tenido en cuenta los puntos de entrada de los 6 motores y la velocidad requerida por parte de la caldera. Para un buen funcionamiento de ésta es conveniente minimizar las fluctuaciones de velocidad de los gases dentro de lo posible, con lo que se insertará un ensanchamiento en el colector.

Como se muestra en el anexo de especificaciones C.2, la velocidad requerida por la caldera debe estar en el intervalo 20 – 25 m/s. Con esto se impone una velocidad en los conductos individuales de cada motor, previos al colector común (observar plano MNE-CGE-01), de 24 m/s. De esta manera y mediante la fórmula siguiente se obtiene:

$$Q_M = v \cdot \frac{\pi \cdot d_M^2}{4} \Rightarrow d_M = \sqrt{\frac{Q_M \cdot 4}{v \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{5,22 \cdot 4}{24 \cdot \pi}} = 0,526 \text{ m}$$

Como el Diámetro Nominal de salida del motor DN500 se coge  $d_M = 500 \text{ mm}$  y se recalcula la velocidad:

$$v = \frac{Q_M \cdot 4}{\pi \cdot d_M^2} = \frac{5,22 \cdot 4}{\pi \cdot 0,5^2} = 26,58 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sabiendo que después de la entrada de gases de escape procedentes del sexto motor el caudal será  $Q_{GE} = 6 \cdot Q_M = 6 \cdot 5,22 = 31,32 \text{ m}^3/\text{s}$ , e imponiendo una velocidad de los gases a la entrada de la caldera de 24 m/s se obtiene:

$$Q_{GE} = v \cdot \frac{\pi \cdot d_{ec}^2}{4} \Rightarrow d_{ec}(\text{entrada caldera}) = \sqrt{\frac{Q_{GE} \cdot 4}{v \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{31,32 \cdot 4}{24 \cdot \pi}} = 1,29 \text{ m}$$

Con lo que cogiendo  $d_{ec} = 1300 \text{ mm}$  se recalcula la velocidad de entrada a caldera:

$$v = \frac{Q_{GE} \cdot 4}{\pi \cdot d_{ce}^2} = \frac{31,32 \cdot 4}{\pi \cdot 1,3^2} = 23,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A partir de los diámetros calculados y procurando minimizar el intervalo de variación de la velocidad de los gases desde su salida de motores hasta su llegada a caldera, se estima un  $d_{c1} = 800 \text{ mm}$  y el ensanchamiento a 1300 mm situado después del cuarto motor. De



esta manera el esquema del colector queda como se muestra en la figura siguiente:

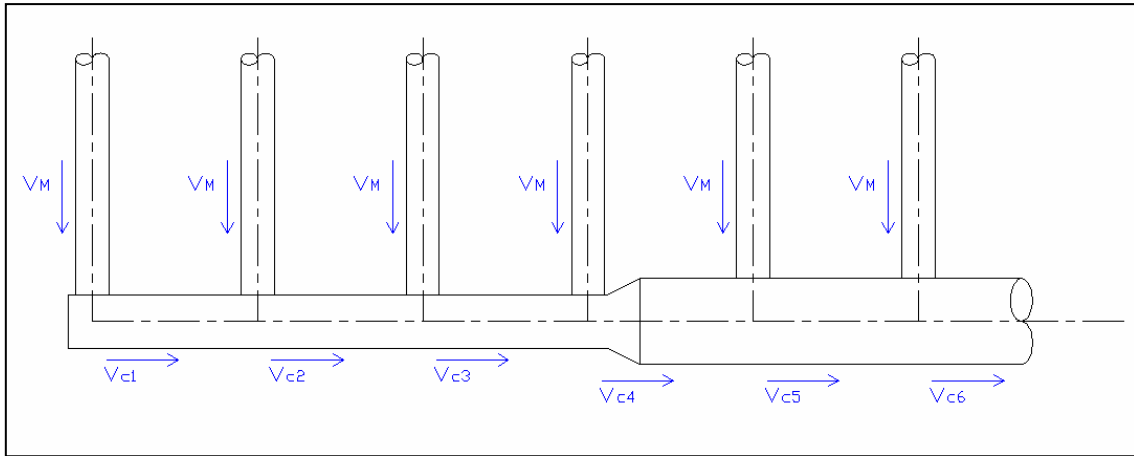


Imagen A.1 – Esquema del colector

Entendiendo  $v_{ci}$  como la velocidad de los gases en el punto inmediatamente posterior al motor  $i$ , y sabiendo que a cada entrada de motor el caudal del colector es de la forma  $Q_M \cdot i$ , se obtienen las velocidades especificadas en la imagen A.1:

- $v_{c1} = \frac{Q_M \cdot 4}{\pi \cdot d_{c1}^2} = \frac{5,22 \cdot 4}{\pi \cdot 0,8^2} = 10,38 \frac{m}{s}$
- $v_{c2} = \frac{Q_M \cdot 2 \cdot 4}{\pi \cdot d_{c1}^2} = \frac{5,22 \cdot 2 \cdot 4}{\pi \cdot 0,8^2} = 20,76 \frac{m}{s}$
- $v_{c3} = \frac{Q_M \cdot 3 \cdot 4}{\pi \cdot d_{c1}^2} = \frac{5,22 \cdot 3 \cdot 4}{\pi \cdot 0,8^2} = 31,15 \frac{m}{s}$
- $v_{c4} = \frac{Q_M \cdot 4 \cdot 4}{\pi \cdot d_{ec}^2} = \frac{5,22 \cdot 4 \cdot 4}{\pi \cdot 1,3^2} = 15,73 \frac{m}{s}$
- $v_{c5} = \frac{Q_M \cdot 5 \cdot 4}{\pi \cdot d_{ec}^2} = \frac{5,22 \cdot 5 \cdot 4}{\pi \cdot 1,3^2} = 19,66 \frac{m}{s}$
- $v_{c6} = \frac{Q_M \cdot 6 \cdot 4}{\pi \cdot d_{ec}^2} = \frac{5,22 \cdot 6 \cdot 4}{\pi \cdot 1,3^2} = 23,5 \frac{m}{s}$

Con los resultados obtenidos se toma por válida la estimación de 800 mm como el diámetro del primer tramo del colector común.



### A.3 Cálculo de la altura de la chimenea

El cálculo de la altura de la chimenea de la caldera (se tomará la misma altura para las chimeneas individuales de los motores) se ha basado en el cumplimiento de los niveles de inmisión de ciertos contaminantes a nivel de suelo, impuestos por el “BOE 260 30-10-2003”. Este punto es de relevancia debido a la proximidad de la población de Móra la Nova respecto al punto de Emisión.

Observando las especificaciones facilitadas por el proveedor de los motores, se observa que los niveles más altos de contaminante pertenecen al NO<sub>x</sub>. Extrayendo del BOE mencionado los datos referidos a dicho contaminante se obtiene la tabla A.3:

	Período de	Valor límite
<b>Valor límite horario para la protección de la salud humana</b>	1 hora	200 µg/m <sup>3</sup> de NO <sub>x</sub> que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil
<b>Valor límite anual para la protección de la salud humana</b>	1 año civil	40 µg/m <sup>3</sup> de Nox
<b>Valor límite anual para la protección de la vegetación</b>	1 año civil	30 µg/m <sup>3</sup> de Nox

Tabla A.3 – Valores límite NO<sub>x</sub>

El estudio del nivel de inmisión de NO<sub>x</sub> en Móra la Nova en función de la altura de la chimenea se ha realizado mediante el modelo de dispersión Gausseano en las condiciones de sotavento. Para ello ha sido necesario disponer de las condiciones atmosféricas registradas en los últimos años en la población de Ascó, próxima a Móra la Nova que se muestran en el apartado siguiente ( “Servei Metereològic de Catalunya”).



### A.3.1 Datos climatológicos Ascó

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2000	Tmed (°C) (V)	4	11,8	13,3	15,6	21,4	25,3	26,3	27	23,9	17,6	11,4	9,3
	Tmax (°C) (V)	20,7	23,4	29,5	30	37,3	40	37,8	39,2	39,3	32	24,1	20,1
	Tmin (°C) (V)	-7	-2	-1,5	0,5	9	12,4	13,9	14,8	8,3	4,7	0,1	-1
	Tmax. med (°C) (V)	11,2	20,5	21,5	22,3	28,6	32,8	32,4	34	31,5	24,5	17,7	15,9
	Tmin. med (°C) (V)	-1,1	3,8	5,7	8,9	14,3	18,7	20,6	20,7	16,6	12,1	6,3	5
	v med (m/s) (V)	1,2	2,5	2,6	3	2,9	3,9	4,5	3,8	2,9	2,1	1,7	1,4
	Dir. V (V)	NW	SW	SW	E	E	E	E	E	E	SW	W	NW
	v max (m/s) (V)	57,5	29,1	34,2	18,8	17,8	19,6	31	25,9	19,4	18,9	18,2	21,7
	v max med (m/s) (V)	15,4	11,8	12,2	13,2	12,7	12,9	15,7	13,6	11,6	10,2	9,5	8,9
	Hr med (%) (V)	88	71	67	65	65	60	53	54	60	71	80	89
	Hr min med (%) (V)	63	35	34	37	35	34	31	29	33	44	53	62
	irrad med (MJ/m2) (V)	3,5	7	8,5	17,9	22,1	26,4	24,8	22,1	18,7	11	8	6,5
	p atm med (mbar) (V)	1022	1026	1021	1010	1018	1021	1016	1017	1016	1018	1015	1021
	Precip.max 30 mintos (l/m2) (V)	2,8	0	4	5,4	4,8	0,6	0,4	1,4	1	17,2	2,6	3,2
	Precip.max dia (l/m2) (V)	37,8	0	5,8	9,6	14,6	2,2	0,6	8,8	1,8	99,6	14,6	21,6
	Precip. tot. mes (l/m2) (V)	40,2	0	17	32	29,6	2,2	0,8	9,4	3,4	198,8	37,6	54
2001	Tmed (°C)	8,3	8,6	14,5	14,2	17,3	22,6	22,3	23,2	17,4	15,8	6,5	0,2
	Tmax (°C)	15,6	18,3	29	26,7	34,2	36,3	34,9	33,6	28,2	26,5	16,3	21,7
	Tmin (°C)	0,6	1	0	3,9	3,3	11,8	11,1		7,3	4,5	-3	-11,4
	Tmax. med (°C)	12,2	13,6	20,1	20,2	23,8	29,7	29		23,7	21,4	10,8	4,8
	Tmin. med (°C)	4,7	4,2	9,4	8,9	11,5	16,4	16,8	18,3	12,5	11,1	2,5	-3,9
	v med (m/s)	1,9	2,1	1,9	2,7	1,7	2,4	2,2	2,3	2	1,5	2,3	1,3
	Dir. V (V)	NW	NW	S	NW	S	SE		SE	SE	S	NW	NE
	v max (m/s)	16,4	17,9	17	18,7	18	18,9		13,9	14,7	13,6	20,8	16,3
	v max med (m/s)	9,5	11,2	10,1	12,7	9,7	10,9	10,4	10,4	10,1	8,1	11,2	7,4
	Hr med (%)	73	63	58	50	60	51	60	62	62	75	70	82
	Hr min med (%)	56	43	38	30	37	28	33	35	35	50	51	56
	irrad med (MJ/m2)	7,7	13,2	16,7	24,2	25	30	26,3	23,3	20,1	12,5	8,6	6,8
	p atm med (mbar) (V)												
	Precip.max 30 mintos (l/m2) (V)	2	1	3,8	7,4	22,6	1,6	8,8	3,4	14,6	2,2	5,2	0,8
	Precip.max dia (l/m2)	6,1	4,9	19,8	47,3	35	4,4	17,4	0,8	13,7	4,4	23,4	2,8
	Precip. tot. mes (l/m2)	21,4	7,5	35,6	54,3	89,1	5,3	36,8	1,2	30,7	15,9	49,1	5
2002	Tmed (°C)	6,4	7,5	9,7	10,9	13,6	19,9	21,4	21,8	19,8	16,7	12,6	9
	Tmax (°C)	15,3	18,7	25,4	27,6	25,1	31,6	31,9	36,5	29,3	26,1	23,6	18,1
	Tmin (°C)	-1,2	-2,1	-2	0,9	4,3	7,5	9,9	13,5	9,7	6,5	2,7	0,5
	Tmax. med (°C)	10,8	13,1	14,7	17,2	19,1	26,1	28,4	28,2	25,4	21,8	16,8	12,6
	Tmin. med (°C)	2,6	2,8	5,4	5,9	8,7	14,5	15,8	17	15,4	12	8	5,6
	v med (m/s)	1,7	2,2	2,1	1,9	2,4	2,6	2,6	2,3	1,9	1,8	2,1	1,9
	Dir. v (V)	N	NW	SE	N	SE	SE	SE	S	SE	SE	NW	NW
	v max (m/s)	16,6	18,7	14,9	17	14,8	16,5	15,8	14,3	14,5	14,8	19,6	19



	v max med (m/s)	9,6	10,8	10	10	10,9	11,2	11,5	10,8	9,6	9	11,1	9,5
	Hr med (%)	73	64	68	66	63	52	58	65	68	69	67	79
	Hr min med (%)	54	42	45	37	39	29	30	39	43	47	49	63
	irrad med (MJ/m2)	8,1	13,3	14,8	19,5	23,6	27,2	26,9	21,7	17,9	12,7	8,4	5,4
	p atm med (mbar) (V)												
	Precip.max 30 mintos (l/m2) (V)	1,4	1,4	3,6	5,4	4,8	1,8	0,8	7,4	8,8	3,6	9,4	1,8
	Precip.max dia (l/m2)	5,3	5,3	18,4	17,2	44	5,3	2	26,3	28,1	11,9	21	5,3
	Precip. tot. mes (l/m2)	8,1	5,7	54,5	64,2	92,1	17,2	6,5	65,2	51,7	27,1	23,4	22
2003	Tmed (°C)	6,8	7,2	11,5	13,8	17,8	24,9	25,8	27	20,5	15,1	11,1	7,8
	Tmax (°C)	20,8	16,3	21,7	25,9	30,6	37,7	37,6	38,8	29,9	27,3	19	16,1
	Tmin (°C)	-5,2	-5,1	-1,6	4,1	8,1	14,3	15,8	16,7	11,2	1,5	2,7	0,2
	Tmax. med (°C)	11,2	11,1	17,3	19,6	23,9	31,7	32,6	34,1	26,1	19,2	15,3	11,5
	Tmin. med (°C)	2,6	3,1	6,5	8,8	12,4	19	20,3	20,8	16,2	11,4	7,6	4,1
	v med (m/s)	2,5	2,3	1,8	2,2	2,1	2,2	2,2	1,8	1,9	1,9	1,5	2
	Dir. v	W	W	S	S	S	S	S	S	S	W	W	W
	v max (m/s)	19,9	20,9	16,5	19,4	15,5	14,5	14,4	11,2	21,6	16,9	18,8	18,6
	v max med (m/s)	12,2	10,8	8,7	10,3	10,5	10,4	10,7	9,3	9,6	9,4	8,5	9,6
	Hr med (%)	67	69	69	64	62	56	56	53	68	70	79	78
	Hr min med (%)	48	50	44	38	40	33	31	27	44	52	61	61
	irrad med (MJ/m2)	7,9	8,9	14,6	19,3	23,9	26,5	25,9	23,5	16,2	10,7	6,9	6
	p atm med (mbar) (V)	1008	1008	1011	1004	1007	1005	1005	1006	1009	1002	1004	1005
	Precip.max 30 mintos (l/m2) (V)	0,8	4,8	6,4	2	5,8	1,6	10,8	9	4,2	3,4	14,8	3,2
	Precip.max dia (l/m2)	3,4	52,3	57	18,1	47	5,2	9,5	26,3	17,9	11,5	47	6,4
	Precip. tot. mes (l/m2)	13,8	100,9	71,8	30,9	95,5	8,2	11,9	36,3	45,8	63,8	93	24

Tabla A.4 – Datos climatológicos Ascó / Vinebre

Donde:

$T_{med}$  (°C): Temperatura media mensual

$T_{max}$  (°C): Temperatura máxima absoluta mensual

$T_{min}$  (°C): Temperatura mínima absoluta mensual

$T_{max. med}$  (°C): Media mensual de las temperaturas máximas diarias

$T_{min. med}$  (°C): Media mensual de las temperaturas mínimas diarias

$v_{med}$  (m/s): Velocidad del viento media mensual

$v_{max}$  (m/s): Valor máximo absoluto mensual de la racha instantánea de viento

$v_{max. med}$  (m/s): Media mensual de las rachas instantáneas máximas diarias de



viento

Dir. v: Dirección dominante del viento mensual

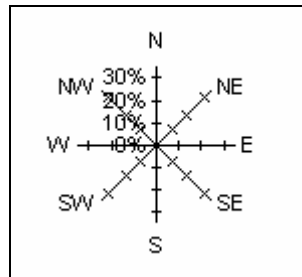


Imagen A.2 – Rosa de los vientos

$H_{r\text{ med}}$  (%): Humedad relativa media mensual

$H_{r\text{ min. med}}$  (%): Media mensual de las humedades relativas mínimas diarias

$I_{\text{rad. med.}}$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ): Irradiación solar media horaria

$p_{\text{atm. med}}$  (mbar): Presión atmosférica media mensual

$\text{Precip. max. 30 min.}$  ( $\text{l}/\text{m}^2$ ): Precipitación máxima mensual en 30 minutos

$\text{Precip. max. día}$  ( $\text{l}/\text{m}^2$ ): Precipitación máxima mensual en 1 día

$\text{Precip. tot. mes}$  ( $\text{l}/\text{m}^2$ ): Precipitación mensual

(V): Datos de Vinebre (próximo a Ascó)





### A.3.2 Cálculo de inmisión

Como se ha comentado en los apartados anteriores del presente anexo para el cálculo del nivel de inmisión de NO<sub>x</sub> a la población de Móra la Nova, se ha utilizado un modelo de dispersión Gausseano que sigue la fórmula siguiente:

$$X(x, y, z) = \frac{Q_{NOx}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_y \cdot u} \cdot e^{\left(-0,5 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)} \cdot \left[ e^{\left(-0,5 \left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right)} + e^{\left(-0,5 \left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right)} \right]$$

Donde:

X (x, y, z) [mg/m<sup>3</sup>]: Concentración de X en el punto (x, y, z).

Q<sub>Nox</sub> [mg/s]: Caudal de NO<sub>x</sub> procedente de los gases de escape.

(x, y, z) [m]: Punto de medición del nivel de inmisión respecto el punto de referencia (punto de emisión a nivel de la población).

H [m]: Altura del penacho de gases de escape.

U [m/s]: Velocidad del viento (en la dirección de x)

σ<sub>y</sub> [m]: Coeficiente de dispersión horizontal

σ<sub>z</sub> [m]: Coeficiente de dispersión vertical

Considerando el peor de los casos, es decir, en condiciones de sotavento (y = 0, z=0). Esto es que la medición se realiza a nivel del suelo y en la dirección del viento, considerando que éste apunta directamente a la población. De esta manera, la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$X(x,0,0) \left[ \frac{g}{m^3} \right] = \frac{Q_{NOx}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{\left[-0,5 \cdot \left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right]}$$

- Cálculo de Q<sub>Nox</sub>

Para el cálculo del caudal de contaminante, se parte del nivel máximo de emisión garantizado por el proveedor de los motores (en función del caudal de gases de



escape) y del caudal de gases de escape.

Como las condiciones de los gases de escape tiene unas características a la entrada a caldera, otras a la salida de la chimenea y otras en el punto de inmisión, a efectos prácticos se referencian a Condiciones Normales ( $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 1,013\text{ bar}$ ). Para ello se calcula la densidad de los gases de escape a las condiciones de salida de motores, realizando una media ponderada de sus componentes, Esto es:

$$\begin{aligned}\rho_{GE}^{T,p} &= \frac{Q_{CO_2} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{Q_{GE} \left[ \frac{m^3}{h} \right]} \cdot \rho_{CO_2}^{T,p} + \frac{Q_{H_2O} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{Q_{GE} \left[ \frac{m^3}{h} \right]} \cdot \rho_{H_2O}^{T,p} + \frac{Q_{O_2} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{Q_{GE} \left[ \frac{m^3}{h} \right]} \cdot \rho_{O_2}^{T,p} + \frac{Q_{N_2} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{Q_{GE} \left[ \frac{m^3}{h} \right]} \cdot \rho_{N_2}^{T,p} = \\ &= \frac{12075,8}{112676} \cdot 0,7194 + \frac{1589}{112676} \cdot 3,3333 + \frac{5182,9}{112676} \cdot 0,5208 + \frac{93828,3}{112676} \cdot 0,4504 = 0,51 \frac{kg}{m^3}\end{aligned}$$

A partir de aquí una buena estimación de la densidad de los gases a Condiciones Normales se realiza siguiendo la siguiente expresión:

$$\rho_{GE}^{CN} = \rho_{GE}^{T,p} \cdot \frac{p_{CN}}{p} \cdot \frac{T}{T_{CN}} = 0,51 \cdot \frac{1,013}{1,07} \cdot \frac{463 + 273}{273} = 1,3 \frac{kg}{m^3}$$

Por lo tanto:

$$Q_{GE}^{CN} = Q_{GE} \cdot \rho_{GE}^{T,p} \cdot \frac{1}{\rho_{GE}^{CN}} = 112676 \cdot 0,51 \cdot \frac{1}{1,3} = 44203,7 \frac{m^3}{h}$$

Y, finalmente, se calcula el caudal másico de  $NO_x$  vertido a la atmósfera, utilizando la emisión garantizada por el proveedor de los motores:

$$\begin{aligned}Emisión\ NO_x &= 500 \frac{mg}{m^3_{GE}} \\ Q_{NO_x} &= Emisión\ NO_x \left[ \frac{mg}{m^3_{GE}} \right] \cdot Q_{GE}^{CN} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[ \frac{h}{s} \right] = \\ &= 500 \cdot 44203,7 \cdot \frac{1}{3600} = 6,14 \cdot 10^3 \frac{mg}{s}\end{aligned}$$

- Velocidad del viento

A partir de los datos climatológicos de Ascó mostrados en el anexo A.3.1 se extrae la



velocidad del viento. Posteriormente a haber hecho una serie de simulaciones con diferentes velocidades de viento que pueden ser consideradas medias anuales, se determina que la más crítica es  $u = 2,2$  m/s en promedios anuales. En lo que se refiere a situaciones puntuales la velocidad más crítica es  $u = 5$  m/s. Hay que tener en cuenta que el nivel crítico de la velocidad del viento está ligado a las condiciones atmosféricas y por lo tanto estas velocidades son las más críticas para condiciones atmosféricas propias de la zona.

- Coeficientes de dispersión

Los coeficientes de dispersión del eje y y del eje z se calculan mediante las fórmulas:

$$\sigma_y[m] = a \cdot x^p$$

$$\sigma_z[m] = b \cdot x^q$$

Donde a, b, p y q son parámetros, extraídos del *Manual de Cálculo de Altura de Chimeneas industriales* (ver anexo B), que varían en función de la estabilidad de las condiciones atmosféricas extraídas de la tabla de Pasquill:

Viento Superficial	Noche		Insolación		
Velocidad (m/s)	Cobert.Nuves ≥4/8	Cobert.Nuves ≤3/8		Moderada	Ligera
<2			A	A-B	B
2_3	E	F	A-B	B	C
3_5	D	E	B	B-C	C
5_6	D	D	C	C-D	D
>6	D	D	C	D	D

Tabla A.5 – Tabla de Pasquill



		<b>a</b>	<b>p</b>	<b>b</b>	<b>q</b>
<b>CONDICIONES ATMOSFÉRICAS</b>	<b>A</b>	0,40	0,91	0,41	0,91
	<b>B</b>	0,36	0,86	0,33	0,86
	<b>C</b>	0,36	0,86	0,30	0,86
	<b>D</b>	0,32	0,78	0,22	0,78
	<b>E</b>	0,31	0,74	0,16	0,74
	<b>F</b>	0,31	0,71	0,06	0,71

Tabla A.6 – Parámetros a, b, c, d en función de estabilidad atmosférica

- Cálculo de h

La h hace referencia a la altura del penacho respecto el nivel de la población. Esto es:

$$h = h_c + (z_{emi} - z_{pobl}) + \Delta h$$

Donde:

$h_c$  (m): Altura de la chimenea respecto el nivel del suelo donde se ubica la planta. Se hará variar entre 15 m y 25 m, comprobando que cumple los límites de inmisión.

$Z_{emi}$  = 43 m: Altura del suelo donde se ubica la planta respecto al nivel del mar.

$Z_{pobl}$  = 31 m: Altura del suelo de la población respecto al nivel del mar.

$\Delta h$  (m): Incremento de altura del penacho respecto el punto más alto de la fuente de emisión (respecto el punto más alto de la chimenea).

Para el cálculo de la sobre-elevación del penacho se deben distinguir tres situaciones distintas en función de las condiciones de estabilidad atmosférica que se han estimado:



1) Condiciones inestables y neutras (A, B, C y D según la tabla de Pasquill)

En estas condiciones atmosféricas el principal factor que afecta al cálculo de la sobre-elevación del penacho es el factor térmico F, que se determina mediante la expresión siguiente:

$$F \left[ \frac{m^4}{s^3} \right] = g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot v_s \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot \frac{d_f^2}{4} [m^2] \cdot \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right)$$

Donde:

$g$  (m/s<sup>2</sup>): Aceleración gravitatoria.

$V_s$  (m/s): Velocidad de los gases de escape a la salida de la chimenea.

$D_f^2$  (m): Diámetro de la chimenea.

$T_s$  (K): Temperatura de los gases a la salida de la chimenea.

$T_a$  (K): Temperatura del aire.

Con la finalidad de aportar algo más de velocidad a los gases a su salida y reducir el nivel de inmisión en la población se disminuye el diámetro de la chimenea a 1200 mm.

Teniendo en cuenta que los gases salen del economizador a una temperatura de 160 °C, se referencia el caudal a esta temperatura para encontrar la velocidad real de salida de los gases:

$$\begin{aligned} \rho_{GE}^{T,p} &= \rho_{GE}^{CN} \cdot \frac{p}{p_{CN}} \cdot \frac{T_{CN}}{T} = 1,3 \cdot \frac{1,013}{1,013} \cdot \frac{273}{160 + 273} = 0,82 \frac{kg}{m^3} \\ Q_{GE}^{T,p} &= Q_{GE}^{CN} \cdot \rho_{GE}^{CN} \cdot \frac{1}{\rho_{GE}^{T,p}} = 44203,7 \cdot 1,3 \cdot \frac{1}{0,82} = 70079,1 \frac{m^3}{h} = 19,47 \frac{m^3}{s} \\ v_s &= \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d_f^2} = \frac{19,47 \cdot 4}{\pi \cdot 1,2^2} = 17,21 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

En este punto, una vez calculado el factor térmico (F), se deben realizar dos nuevas distinciones:



a)  $F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$

En estas condiciones se tiene:

$$x^* [m] = 14 \cdot F^{\frac{5}{8}} \rightarrow x_f = 3,5 \cdot x^* [m]$$

b)  $F > 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$

En estas condiciones se tiene:

$$x^* [m] = 34 \cdot F^{\frac{2}{5}} \rightarrow x_f = 3,5 \cdot x^* [m]$$

Donde  $x_f$  es el punto donde el penacho alcanza su máxima altitud ( $\Delta h$ ). A partir de aquí, se debe distinguir si la distancia de la población respecto el punto de emisión ( $x = 1100 \text{ m}$ ), es mayor o menor que la  $x_f$  obtenida. De este modo se siguen dos fórmulas (fórmula de G.A. Briggs) para el cálculo de  $\Delta h$ :

i.  $x < x_f$

$$\Delta h [m] = 1,6 \cdot \frac{F^{\frac{1}{3}} \cdot x^{\frac{2}{3}}}{u}$$

ii.  $x > x_f$

$$\Delta h [m] = 1,6 \cdot \frac{F^{\frac{1}{3}} \cdot x_f^{\frac{2}{3}}}{u}$$

## 2) Condiciones estables (E y F según la tabla de Pasquill)

En estas condiciones hay dos factores que afectan a la sobre-elevación del penacho: el factor térmico F y el factor de estabilidad S. Mientras que el factor térmico se calcula análogamente que en el caso de condiciones inestables o neutras, el factor de estabilidad se rige por la siguiente expresión:



$$S[s^{-2}] = \frac{g}{T_a} \cdot \left( \Gamma + \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Donde:

$\Gamma = 0,01$  K/m: Gradiente térmico

$\partial T/\partial z$  (K/m): Corrección del gradiente térmico. Si la situación atmosférica es E adquiere el valor de 0,001 K/m, si la situación atmosférica es F adquiere el valor de 0,025 K/m.

Una vez calculado el factor de estabilidad, se obtiene la  $x_f$  con la fórmula:

$$x_f[m] = \frac{\pi \cdot u}{\sqrt{S}}$$

Finalmente, la sobre-elevación del penacho se calcula en función de la  $x_f$  obtenida de la siguiente manera:

i.  $x < x_f$

$$\Delta h[m] = 1,6 \cdot \frac{F^{\frac{1}{3}} \cdot x^{\frac{2}{3}}}{u}$$

ii.  $x > x_f$

$$\Delta h[m] = 2,4 \cdot \left( \frac{F}{u \cdot S} \right)^{\frac{1}{3}}$$

### 3) Calma atmosférica (velocidad del viento nula)

En estas condiciones se parte del factor térmico F y el factor de estabilidad S, calculados análogamente a los casos anteriores. La fórmula de la sobre-elevación en esta situación queda:

$$\Delta h[m] = 5 \cdot F^{\frac{4}{3}} \cdot S^{\frac{-3}{8}}$$



### A.3.3 Resultados

Se han hecho, con el proceso descrito anteriormente, diversas simulaciones para alturas de chimenea de 15, 20 y 25 m, en situaciones críticas tanto promedios anuales como en situaciones puntuales. Los resultados de dichas simulaciones son:

- Simulación promedios anuales

SIMULACIÓN 1			SIMULACIÓN 2			SIMULACIÓN 3		
T <sub>a</sub> (K)	289,7		T <sub>a</sub> (K)	287		T <sub>a</sub> (K)	293	
u (m/s)	2,2		u (m/s)	2,3		u (m/s)	2,7	
Estabilidad atm. B	a	0,36	Estabilidad atm. B	a	0,36	Estabilidad atm. B	a	0,36
	b	0,33		b	0,33		b	0,33
	p	0,86		p	0,86		p	0,86
	q	0,86		q	0,86		q	0,86
σ <sub>y</sub> (m)	148,56		σ <sub>y</sub> (m)	148,56		σ <sub>y</sub> (m)	148,56	
σ <sub>z</sub> (m)	136,18		σ <sub>z</sub> (m)	136,18		σ <sub>z</sub> (m)	136,18	
F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	20,11		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	20,25		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	19,64	
S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****	
∂T/∂z	*****		∂T/∂z	*****		∂T/∂z	*****	
x <sub>f</sub> (m)	319,76		x <sub>f</sub> (m)	321,15		x <sub>f</sub> (m)	315,07	
Δh (m)	92,48		Δh (m)	88,92		Δh (m)	74,03	
[NOx] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NOx] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NOx] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m	
	29,9			29,2			27,2	
	h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m	
	28,9			28,3			26,4	
	h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m	





	28,0			27,4			25,7	
SIMULACIÓN 4			SIMULACIÓN 5			SIMULACIÓN 6		
T <sub>a</sub> (K)	289,7		T <sub>a</sub> (K)	288,7		T <sub>a</sub> (K)	293	
u (m/s)	2,2		u (m/s)	2,3		u (m/s)	2,7	
Estabilidad at. E	a	0,31	Estabilidad atm. E	a	0,31	Estabilidad atm. E	a	0,31
	b	0,16		b	0,16		b	0,16
	p	0,74		p	0,74		p	0,74
	q	0,74		q	0,74		q	0,74
σ <sub>y</sub> (m)	55,21		σ <sub>y</sub> (m)	55,21		σ <sub>y</sub> (m)	55,21	
σ <sub>z</sub> (m)	28,49		σ <sub>z</sub> (m)	28,49		σ <sub>z</sub> (m)	28,49	
F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	20,11		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	20,25		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	19,64	
S (s <sup>-2</sup> )	0,0012		S (s <sup>-2</sup> )	0,0012		S (s <sup>-2</sup> )	0,0012	
∂T/∂z	0,03		∂T/∂z	0,03		∂T/∂z	0,03	
x <sub>f</sub> (m)	200,76		x <sub>f</sub> (m)	209,72		x <sub>f</sub> (m)	247,79	
Δh (m)	47,43		Δh (m)	46,79		Δh (m)	44,13	
[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m	
	18,6			18,9			20,4	
	h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m	
	11,6			11,8			13,0	
	h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m	
	7,0			7,2			8,0	

Tabla A.7 – Inmisión NO<sub>x</sub> promedios anuales

- Simulación situaciones puntuales

SIMULACIÓN 1			SIMULACIÓN 2			SIMULACIÓN 3			SIMULACIÓN 4		
T <sub>a</sub> (K)	303		T <sub>a</sub> (K)	308		T <sub>a</sub> (K)	298		T <sub>a</sub> (K)	303	
u (m/s)	1		u (m/s)	2,5		u (m/s)	5,5		u (m/s)	3,5	
Estabilidad atm. A	a	0,4	Estabilidad atm. A	a	0,4	Estabilidad atm. D	a	0,32	Estabilidad atm. D	a	0,32
	b	0,41		b	0,41		b	0,22		b	0,22
	p	0,91		p	0,91		p	0,78		p	0,78
	q	0,91		q	0,91		q	0,78		q	0,78
σ <sub>y</sub> (m)	234,28		σ <sub>y</sub> (m)	234,28		σ <sub>y</sub> (m)	75,41		σ <sub>y</sub> (m)	75,41	
σ <sub>z</sub> (m)	240,13		σ <sub>z</sub> (m)	240,13		σ <sub>z</sub> (m)	51,85		σ <sub>z</sub> (m)	51,85	
F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	18,24		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	17,54		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	18,94		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	18,24	
S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****	
$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****	
x <sub>f</sub> (m)	300,84		x <sub>f</sub> (m)	293,57		x <sub>f</sub> (m)	308,01		x <sub>f</sub> (m)	300,84	
Δh (m)	92,48		Δh (m)	73,45		Δh (m)	35,37		Δh (m)	54,03	
[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m	
	23,2			12,7			44,1			42,1	
	h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m	
	22,7			12,6			39,1			36,1	
	h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m	



	22,3			12,5			34,3			30,6	
SIMULACIÓN 5			SIMULACIÓN 6			SIMULACIÓN 7			SIMULACIÓN 8		
T <sub>a</sub> (K)	288		T <sub>a</sub> (K)	278		T <sub>a</sub> (K)	303		T <sub>a</sub> (K)	288	
u (m/s)	5		u (m/s)	2,5		u (m/s)	3,5		u (m/s)	3,5	
Estabilidad atm. D	a	0,32	Estabilidad a. D	a	0,32	Estabilidad atm. E	a	0,31	Estabilidad atm. E	a	0,31
	b	0,22		b	0,22		b	0,16		b	0,16
	p	0,78		p	0,78		p	0,74		p	0,74
	q	0,78		q	0,78		q	0,74		q	0,74
σ <sub>y</sub> (m)	75,41		σ <sub>y</sub> (m)	75,41		σ <sub>y</sub> (m)	55,21		σ <sub>y</sub> (m)	55,21	
σ <sub>z</sub> (m)	51,85		σ <sub>z</sub> (m)	51,85		σ <sub>z</sub> (m)	28,49		σ <sub>z</sub> (m)	28,49	
F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	16,98		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	21,75		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	18,24		F (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	19,64	
S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****		S (s <sup>-2</sup> )	*****	
$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****		$\frac{\partial T}{\partial z}$ (K/m)	*****	
x <sub>f</sub> (m)	287,68		x <sub>f</sub> (m)	335,82		x <sub>f</sub> (m)	326,64		x <sub>f</sub> (m)	318,45	
Δh (m)	35,84		Δh (m)	86,31		Δh (m)	39,93		Δh (m)	74,03	
[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m		[NO <sub>x</sub> ] (μg/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> = 15 m	
	48,0			18,4			22,5			21,1	
	h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m			h <sub>c</sub> = 20 m	
	42,5			14,8			14,7			13,7	
	h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m			h <sub>c</sub> = 25 m	
	32,5			11,8			9,3			8,6	

Tabla A.8 – Inmisión NO<sub>x</sub> situaciones puntuales

## A.4 Cálculo de la Pérdida de Carga

Para comprobar que la caída de carga que experimentan los gases de escape no supera los 60 mbar recomendados por el fabricante, se realiza el cálculo de dicha pérdida para los gases provenientes del motor más alejados, y para los diferentes recorridos posibles.

Las pérdidas de carga que se producirán desde motores a atmósfera, tienen dos orígenes diferenciados:

- Pérdida de carga lineal, siguiendo la fórmula:

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Donde :

$\lambda$  : Coeficiente función de la rugosidad del conducto y nº de Reynolds del fluido. Para su cálculo es necesario la rugosidad absoluta del material ( $e = 0,006$  cm para acero comercial) y el número de Reynolds:

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d \text{ (mm)}}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,P} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]}$$

Donde:

$v$  (m/s): Velocidad correspondiente al tramo en cuestión

$d$  (m): Diámetro interior del tramo encuestión

$\mu_{GE}$  (kg/m·s): Viscosidad dinámica de los gases de escape

Con el número de Reynolds y la rugosidad relativa se obtiene  $\lambda$  gráficamente del diagrama de Moody, que se muestra en la imagen siguiente:



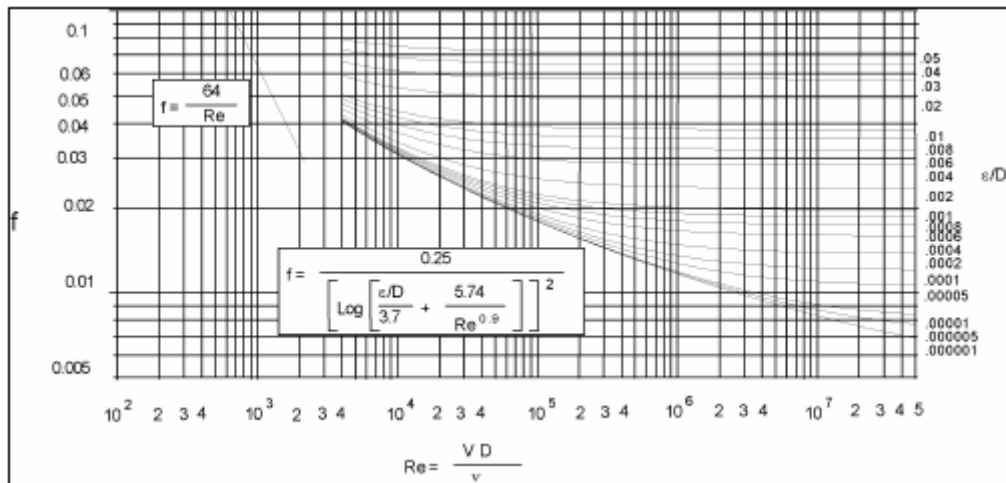


Imagen A.3 – Diagrama de Moody

L: Longitud del conducto (m)

D: Diámetro del conducto (m)

v: Velocidad del fluido (m/s)

g: 9,8 m/s<sup>2</sup>

- Pérdida de carga singular, siguiendo la fórmula:

$$\Delta h_s = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

k: Coeficiente de pérdida singular

v: Velocidad del fluido (m/s)

g: 9,8 m/s<sup>2</sup>

Para elementos determinados como pueden ser la caldera, el silenciador o el economizador, el proveedor asegura que la pérdida de carga que tiene lugar en éstos es menor a un cierto valor, con lo cual se coge dicho valor por ser el más crítico garantizado.

#### 1) Recorrido de caldera de recuperación

Este recorrido se da para un funcionamiento normal de la planta. Esto es que los gases



pasan por la caldera de recuperación y son utilizados por esta para generar vapor. Para el cálculo de la pérdida es necesario distinguir entre los diferentes tramos del colector:

- Tramo motor (de motor a colector)

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{500} = 1,2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d \text{ [m]}}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 26,48 \cdot 0,5}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 1,9 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,017$$

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,017 \cdot \frac{7}{0,5} \cdot \frac{26,48^2}{2 \cdot 9,8} = 8,51 \text{ mcf} =$$

$$= 8,51 \text{ [mcf]} \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,42 \text{ mbar}$$

- Pérdida singular

La única pérdida singular que actúa en este tramo es la del silenciador. Según especificaciones del proveedor ésta es:

$$\Delta h_s = 10 \text{ mbar}$$

Por lo tanto se tiene en este tramo:

$$\Delta h_M = \Delta h_l + \Delta h_s = 0,42 + 10 = 10,42 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 1 (desde la entrada del caudal del primer motor hasta la entrada del segundo)

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{C1} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{800} = 7,5 \cdot 10^{-5}$$



$$Re = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot v_{c1} \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot d_{c1} [m]}{\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]} = \frac{0,51 \cdot 10,34 \cdot 0,8}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 1,2 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,017$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d_{c1}} \cdot \frac{v_{c1}^2}{2 \cdot g} = 0,017 \cdot \frac{4,5}{0,8} \cdot \frac{10,34^2}{2 \cdot 9,8} = 0,51 \text{ mcf} = \\ &= 0,51 [mcf] \cdot 0,51 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \end{aligned}$$

#### - Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de caudal de I motor. Con la relación entre caudales y la relación entre secciones se extrae gráficamente el coeficiente de pérdida singular de *Vademecum de mecánica de fluidos i máquinas hidráulicas* (ver bibliografía de memoria):

$$\frac{Q_M}{Q_{c1}} = 1; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{c1}^2} = \frac{0,5^2}{0,8^2} = 0,39$$

$$k = 7,4$$

$$\begin{aligned} \Delta h_s &= k \cdot \frac{v_{c1}^2}{2 \cdot g} = 7,4 \cdot \frac{10,34^2}{2 \cdot 9,8} = 40,37 \text{ mcf} = 40,37 [mcf] \cdot 0,51 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = \\ &= 2,02 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c1} = \Delta h_l + \Delta h_s = 2,5 \cdot 10^{-2} + 2,02 = 2,04 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 2 (desde la entrada del caudal del segundo motor hasta la entrada del tercero)

#### - Pérdida lineal



$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{c1} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{800} = 7,5 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v_{c2} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d_{c1} [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 20,69 \cdot 0,8}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 2,4 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,016$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d_{c1}} \cdot \frac{v_{c2}^2}{2 \cdot g} = 0,016 \cdot \frac{4,5}{0,8} \cdot \frac{20,69^2}{2 \cdot 9,8} = 1,95 \text{ mcf} = \\ &= 1,95 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,1 \text{ mbar} \end{aligned}$$

- Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de caudal del motor:

$$\frac{Q_M}{Q_{c2}} = 0,5; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{c1}^2} = \frac{0,5^2}{0,8^2} = 0,39$$

$$k = 0,52$$

$$\begin{aligned} \Delta h_s &= k \cdot \frac{v_{c2}^2}{2 \cdot g} = 0,52 \cdot \frac{20,69^2}{2 \cdot 9,8} = 11,36 \text{ mcf} = 11,36 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = \\ &= 0,57 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c2} = \Delta h_l + \Delta h_s = 0,1 + 0,57 = 0,67 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 3 (desde la entrada del caudal del tercer motor hasta la entrada del cuarto)

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{c1} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{800} = 7,5 \cdot 10^{-5}$$





$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v_{c3} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d_{c1} [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 31,03 \cdot 0,8}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 2,4 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,015$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d_{c1}} \cdot \frac{v_{c3}^2}{2 \cdot g} = 0,015 \cdot \frac{4,5}{0,8} \cdot \frac{31,03^2}{2 \cdot 9,8} = 4,1 \text{ mcf} = \\ &= 4,1 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,2 \text{ mbar} \end{aligned}$$

- Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de caudal del motor:

$$\frac{Q_M}{Q_{c3}} = 0,33; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{c1}^2} = \frac{0,5^2}{0,8^2} = 0,39$$

$$k = 0,4$$

$$\begin{aligned} \Delta h_s &= k \cdot \frac{v_{c3}^2}{2 \cdot g} = 0,4 \cdot \frac{31,03^2}{2 \cdot 9,8} = 19,65 \text{ mcf} = 19,65 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = \\ &= 0,98 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c4} = \Delta h_l + \Delta h_s = 0,2 + 0,98 = 1,18 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 4 (desde la entrada del caudal del cuarto motor hasta la entrada del quinto).

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{ec} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{1300} = 4,6 \cdot 10^{-5}$$



$$Re = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot v_{c4} \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot d_{ec} [m]}{\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]} = \frac{0,51 \cdot 15,67 \cdot 1,3}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 2,9 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,015$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d_{ec}} \cdot \frac{v_{c4}^2}{2 \cdot g} = 0,015 \cdot \frac{4,5}{1,3} \cdot \frac{15,67^2}{2 \cdot 9,8} = 0,57 \text{ mcf} = \\ &= 0,57 \text{ [mcf]} \cdot 0,51 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \end{aligned}$$

- Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de caudal del motor y por el ensanchamiento del colector:

$$\frac{Q_M}{Q_{c4}} = 0,25; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{c1}^2} = \frac{0,5^2}{1,3^2} = 0,015$$

$$k = 0,32$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{s1} &= k \cdot \frac{v_{c4}^2}{2 \cdot g} = 0,32 \cdot \frac{15,67^2}{2 \cdot 9,8} = 4 \text{ mcf} = 4 \text{ [mcf]} \cdot 0,51 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = \\ &= 0,2 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Con lo que respecta al ensanchamiento, el coeficiente de pérdida singular se calcula con el ángulo de abertura y la relación de diámetros.

$$\frac{\theta}{2} = 30^\circ; \quad \frac{d_{ec}}{d_{c1}} = \frac{1,3}{0,8}$$

$$k = 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_{c1}^2}{d_{ec}^2}\right)^2 = 2,6 \cdot \sin(30) \cdot \left(1 - \frac{0,8^2}{1,3^2}\right)^2 = 0,5$$



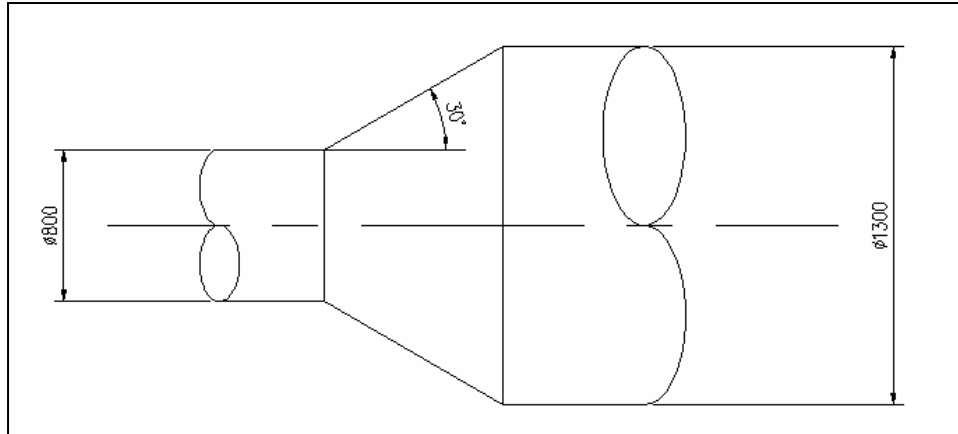


Imagen A.4 – Ensanchamiento

$$\Delta h_{s2} = k \cdot \frac{v_{c4}^2}{2 \cdot g} = 0,5 \cdot \frac{15,67^2}{2 \cdot 9,8} = 6,26 \text{ mcf} = 6,26 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 0,31 \text{ mbar}$$

Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c4} = \Delta h_l + \Delta h_{s1} + \Delta h_{s2} = 2,8 \cdot 10^{-2} + 0,2 + 0,31 = 0,54 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 5 (desde la entrada del caudal del quinto motor hasta la entrada del sexto).

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{ec} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{1300} = 4,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v_{c5} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d_{ec} [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 19,59 \cdot 1,3}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 3,7 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,014$$

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{d_{ec}} \cdot \frac{v_{c5}^2}{2 \cdot g} = 0,014 \cdot \frac{4,5}{1,3} \cdot \frac{19,59^2}{2 \cdot 9,8} = 0,94 \text{ mcf} =$$

$$= 0,94 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,047 \text{ mbar}$$



- Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de caudal del motor:

$$\frac{Q_M}{Q_{c4}} = 0,25; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{ec}^2} = \frac{0,5^2}{1,3^2} = 0,15$$

$$k = 0,25$$

$$\Delta h_s = k \cdot \frac{v_{c5}^2}{2 \cdot g} = 0,25 \cdot \frac{19,59^2}{2 \cdot 9,8} = 4,9 \text{ mcf} = 4,9 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 0,24 \text{ mbar}$$

Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c5} = \Delta h_l + \Delta h_s = 0,047 + 0,24 = 0,29 \text{ mbar}$$

- Tramo colector 6 (desde la entrada del caudal del sexto motor hasta la entrada a caldera).

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_{ec} \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{1300} = 4,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v_{c6} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d_{ec} [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 23,5 \cdot 1,3}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 4,4 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,014$$

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{d_{ec}} \cdot \frac{v_{c6}^2}{2 \cdot g} = 0,014 \cdot \frac{17}{1,3} \cdot \frac{23,5^2}{2 \cdot 9,8} = 4,68 \text{ mcf} =$$

$$= 4,68 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,23 \text{ mbar}$$

- Pérdida singular

En este tramo la pérdida singular viene dada por la T convergente de la entrada de



caudal del motor y por el codo:

$$\frac{Q_M}{Q_{c4}} = 0,17; \quad \frac{S_M}{S_{c1}} = \frac{d_M^2}{d_{ec}^2} = \frac{0,5^2}{1,3^2} = 0,15$$

$$k = 0,23$$

$$\Delta h_{s1} = k \cdot \frac{v_{c5}^2}{2 \cdot g} = 0,23 \cdot \frac{23,5^2}{2 \cdot 9,8} = 6,48 \text{ mcf} = 6,48[\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 0,32 \text{ mbar}$$

Con lo referente al codo, se encuentra el coeficiente de pérdida singular con R y d que se muestran en la siguiente figura, extrayéndolo *Vademecum de mecánica de fluidos i máquinas hidráulicas* (ver bibliografía de memoria):

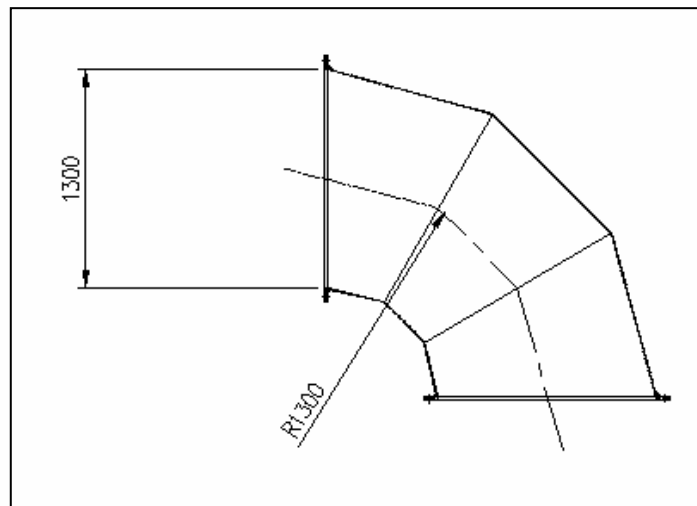


Imagen A.5 – Codo

$$\frac{R}{d} = 1; \quad v_{c6} = 23,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$k = 1,52$$

$$\Delta h_{s2} = k \cdot \frac{v_{c6}^2}{2 \cdot g} = 1,52 \cdot \frac{23,5^2}{2 \cdot 9,8} = 42,8 \text{ mcf} = 42,8[\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 2,14 \text{ mbar}$$



Por lo tanto, en este tramo se tiene:

$$\Delta h_{c6} = \Delta h_l + \Delta h_{s1} + \Delta h_{s2} = 0,23 + 0,32 + 2,14 = 2,69 \text{ mbar}$$

- Caldera

- Pérdida singular

La única pérdida que actúa es la de caldera. Según especificaciones del proveedor ésta es:

$$\Delta h_{cal} = \Delta h_s = 20 \text{ mbar}$$

- Tramo 7 (de caldera a atmósfera)

- Pérdida singular

La pérdida en este tramo son prácticamente solo singulares y vienen dadas por la conexión caldera/economizador, el economizador y la conexión economizador/chimenea. La única componente lineal de la pérdida de carga es la correspondiente a la chimenea.

Para el cálculo de la pérdida singular que causan las conexiones, se calcula el diámetro hidráulico de las bridas cuadradas y son tratadas como un ensanchamiento y un estrechamiento.

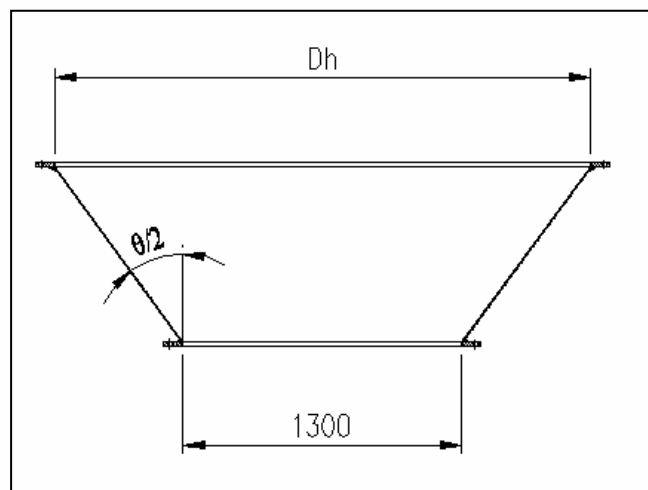


Imagen A.6 – Conexión T-caldera/Economizador



$$D_h = \frac{4 \cdot A_h}{p_h} = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 1,6}{2 \cdot 3,5 + 2 \cdot 1,6} = 2,19 \text{ m}$$

Donde:

$A_h$  (m<sup>2</sup>): Área de la sección

$p_h$  (m): Perímetro hidráulico

Tomando este  $D_h$  y sabiendo que la longitud de la conexión es 840 mm se calcula el ángulo ficticio de apertura:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{D_h - d_{sc}}{2}}{0,84} \Rightarrow \frac{\theta}{2} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{2,19 - 1,3}{2}}{0,84}\right) = 27,9^\circ$$

Con lo que se tiene:

$$\frac{\theta}{2} = 27,9^\circ; \quad \frac{D_h}{d_{sc}} = \frac{2,19}{1,3}$$

$$k = 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_{sc}^2}{D_h^2}\right)^2 = 2,6 \cdot \sin(27,9) \cdot \left(1 - \frac{1,3^2}{2,19^2}\right)^2 = 0,51$$

$$\Delta h_{s1} = k \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 0,51 \cdot \frac{8,90^2}{2 \cdot 9,8} = 2,06 \text{ mcf} = 2,06 [\text{mcf}] \cdot 0,75 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \cdot 9,8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right] \cdot \frac{1}{100} = 0,15 \text{ mbar}$$

Donde  $v_m$  (velocidad media) se calcula referente a la temperatura de 200 °C, que es la temperatura a la que los gases salen de la caldera, mediante:

$$\rho_{GE}^{200;1,013} = \rho_{GE}^{CN} \cdot \frac{p}{p_{CN}} \cdot \frac{T_{CN}}{T} = 1,3 \cdot \frac{1,013}{1,013} \cdot \frac{273}{200 + 273} = 0,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{GE}^{200;1,013} = Q_{GE}^{CN} \cdot \rho_{GE}^{CN} \cdot \frac{1}{\rho_{GE}^{200;1,013}} = 44203,7 \cdot 1,3 \cdot \frac{1}{0,75} = 76619,75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 21,28 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_m = \frac{Q_{GE}^{200;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D_h + d_{sc}}{2}\right)^2} = \frac{21,28 \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{2,19 + 1,3}{2}\right)^2} = 8,90 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Por otra parte, según especificaciones del proveedor el economizador tiene una pérdida de 1,96 mbar, es decir:

$$\Delta h_{s2} = 1,96 \text{ mbar}$$

Posteriormente, se calcula la conexión Economizador/Chimenea de forma análoga a la conexión T-Caldera/Economizador, pero teniendo en cuenta que la temperatura se ha reducido a 160 °C. Esto es:

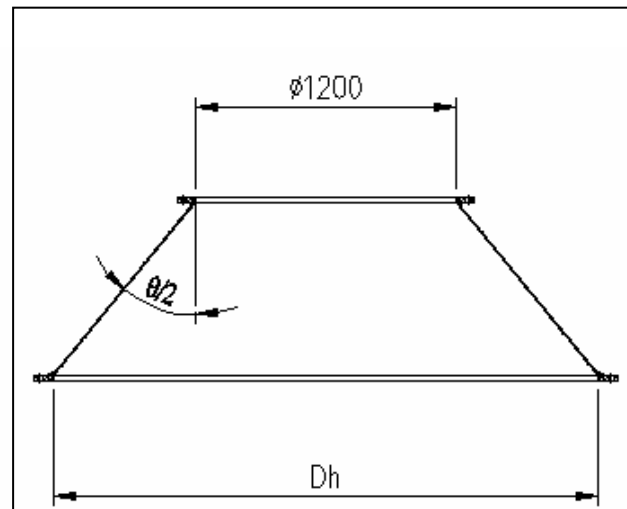


Imagen A.4.5 – Conexión Economizador/Chimenea

$$D_h = 2,19 \text{ m}$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{D_h - d_c}{2}}{0,84} \Rightarrow \frac{\theta}{2} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{2,19 - 1,2}{2}}{0,84}\right) = 30,5^\circ$$

Con lo que se tiene:

$$\frac{\theta}{2} = 30,5^\circ; \quad \frac{D_h}{d_c} = \frac{2,19}{1,2}$$

$$k = 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_c^2}{D_h^2}\right)^2 = 2,6 \cdot \sin(30,5) \cdot \left(1 - \frac{1,2^2}{2,19^2}\right)^2 = 0,65$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{s2} &= k \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 0,61 \cdot \frac{8,62^2}{2 \cdot 9,8} = 2,31 \text{ mcf} = 2,31 [\text{mcf}] \cdot 0,82 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = \\ &= 0,18 \text{ mbar} \end{aligned}$$





Donde  $v_m$  se calcula mediante:

$$v_m = \frac{Q_{GE}^{160;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D_h + d_c}{2}\right)^2} = \frac{19,46 \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{2,19 + 1,2}{2}\right)^2} = 8,62 \frac{m}{s}$$

Finalmente se calcula la pérdida de carga que experimentan los gases en el tramo de chimenea hasta llegar a atmósfera:

- Pérdida lineal

$$v_s = \frac{Q_{GE}^{160;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot d_s^2} = \frac{19,46 \cdot 4}{\pi \cdot 1,2^2} = 17,21 \frac{m}{s}$$

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_c \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{1200} = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$Re = \frac{\rho_{GE}^{160;1,013} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot v_s \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot d_{ec} [m]}{\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]} = \frac{0,82 \cdot 17,21 \cdot 1,2}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 4,8 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,015$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d_c} \cdot \frac{v_s^2}{2 \cdot g} = 0,015 \cdot \frac{6}{1,2} \cdot \frac{17,21^2}{2 \cdot 9,8} = 1,13 \text{ mcf} = \\ &= 1,13 [mcf] \cdot 0,82 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,09 \text{ mbar} \end{aligned}$$

Por lo tanto se tiene para este tramo:

$$\Delta h_{c7} = \Delta h_{s1} + \Delta h_{s2} + \Delta h_{s3} + \Delta h_l = 0,15 + 1,96 + 0,18 + 0,09 = 2,38 \text{ mbar}$$

Con las pérdidas de cada tramo calculadas se obtiene la pérdida de carga total del recorrido 1):

$$\begin{aligned} \Delta h_{T1} &= \Delta h_M + \sum_{i=1}^6 \Delta h_{ci} + \Delta h_{cald} + \Delta h_{c7} = 10,42 + 2,04 + 0,67 + 1,18 + 0,54 + 0,29 + 2,69 + \\ &+ 20 + 2,38 = 40,21 \text{ mbar} \end{aligned}$$



Como se puede observar, la pérdida de carga de los gases de escape en el recorrido 1) es menor que los 60 mbar recomendados por el proveedor de los motores.

## 2) Recorrido colector general sin pasar por caldera

Este recorrido es el que se sigue cuando el divérter DN1300 desvía los gases de escape mediante el conducto que realiza el by-pass hasta la T-CALDERA que lleva los gases hacia la chimenea y finalmente a atmósfera. Este recorrido se utiliza en ocasiones de régimen no permanente como puede ser el tiempo que transcurre desde la puesta en marcha de los motores hasta que los gases de escape han alcanzado una temperatura suficientemente alta para permitir su entrada a caldera.

El cálculo de la pérdida de carga en este recorrido es igual que en el recorrido 1) hasta el tramo 7. Por lo tanto la diferencia será:

- Tramo 7 (de divérter DN1300 a atmósfera)

Se desprecian todas las pérdidas lineales excepto la chimenea. La pérdida de carga del divérter garantizada por el proveedor es:

$$\Delta h_{s1} = 18 \text{ mmca} = 0,018 \text{ mca} \cdot 980 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 1,73 \text{ mbar}$$

Para el cálculo del coeficiente de pérdida de carga en la T-CALDERA se debe comparar la sección de entrada del caudal con la de salida, así como los caudales de entrada y salida:

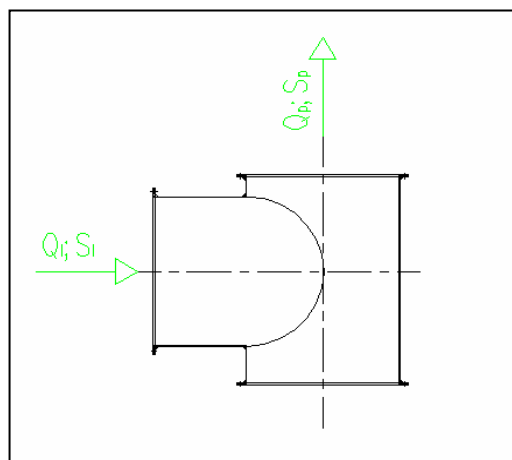


Imagen A.7 – T-Caldera



$$\frac{S_l}{S_p} = 1; \frac{Q_l}{Q_p} = 1 \Rightarrow k = 2$$

$$\Delta h_{s2} = k \cdot \frac{v_{c6}^2}{2 \cdot g} = 2 \cdot \frac{23,5^2}{2 \cdot 9,8} = 56,35 \text{ mcf} = 56,35 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 2,82 \text{ mbar}$$

Para el cálculo de la pérdida singular que causan las conexiones, se calcula como en el recorrido 1), pero teniendo en cuenta que ahora los gases salen a  $T = 463 \text{ }^\circ\text{C}$ , y por lo tanto, la densidad de éstos es  $0,51 \text{ kg/m}^3$ .

- Conexión T-CALDERA/ECONOMIZADOR

$$\frac{\theta}{2} = 27,9^\circ; \quad \frac{D_h}{d_{sc}} = \frac{2,19}{1,3}$$

$$k = 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_{sc}^2}{D_h^2}\right)^2 = 2,6 \cdot \sin(27,9) \cdot \left(1 - \frac{1,3^2}{2,19^2}\right)^2 = 0,51$$

$$\Delta h_{s3} = k \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 0,51 \cdot \frac{13,09^2}{2 \cdot 9,8} = 4,46 \text{ mcf} = 4,46 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 0,22 \text{ mbar}$$

Donde  $v_m$  (velocidad media) se calcula mediante:

$$v_m = \frac{Q_{GE}^{463;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D_h + d_{sc}}{2}\right)^2} = \frac{31,3 \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{2,19 + 1,3}{2}\right)^2} = 13,09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por otra parte, según especificaciones del proveedor el economizador tiene una pérdida de 1,96 mbar, es decir:

$$\Delta h_{s2} = 1,96 \text{ mbar}$$

- Conexión ECONOMIZADOR/CHIMENEA



$$\frac{\theta}{2} = 30,5^\circ; \quad \frac{D_h}{d_c} = \frac{2,19}{1,2}$$

$$k = 2,6 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_c^2}{D_h^2}\right)^2 = 2,6 \cdot \sin(30,5) \cdot \left(1 - \frac{1,2^2}{2,19^2}\right)^2 = 0,65$$

$$\Delta h_{s4} = k \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g} = 0,61 \cdot \frac{13,87^2}{2 \cdot 9,8} = 5,98 \text{ mcf} = 5,98 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} =$$

$$= 0,30 \text{ mbar}$$

Donde  $v_m$  se calcula mediante:

$$v_m = \frac{Q_{GE}^{463;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{D_h + d_c}{2}\right)^2} = \frac{31,3 \cdot 4}{\pi \cdot \left(\frac{2,19 + 1,2}{2}\right)^2} = 13,87 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Pérdida lineal

$$v_s = \frac{Q_{GE}^{463;1,013} \cdot 4}{\pi \cdot d_s^2} = \frac{31,3 \cdot 4}{\pi \cdot 1,2^2} = 27,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d_c \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{1200} = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{463;1,013} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v_s \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d_c [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 27,67 \cdot 1,2}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 4,82 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,015$$

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{L}{d_c} \cdot \frac{v_s^2}{2 \cdot g} = 0,015 \cdot \frac{6}{1,2} \cdot \frac{27,67^2}{2 \cdot 9,8} = 2,93 \text{ mcf} =$$

$$= 2,93 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,15 \text{ mbar}$$

Por lo tanto se tiene para este tramo:



$$\Delta h_{c7} = \Delta h_{s1} + \Delta h_{s2} + \Delta h_{s3} + \Delta h_{s4} + \Delta h_l = 1,73 + 2,82 + 0,22 + 0,30 + 0,15 = 5,22 \text{ mbar}$$

Con las pérdidas de cada tramo calculadas se obtiene la pérdida de carga total del recorrido 1):

$$\Delta h_{T2} = \Delta h_M + \sum_{i=1}^7 \Delta h_{ci} = 10,42 + 2,05 + 0,67 + 1,18 + 0,54 + 0,29 + 2,69 + 5,22 = 23,06 \text{ mbar}$$

Como se puede observar, la pérdida de carga de los gases de escape en el recorrido 2) es menor que los 60 mbar recomendados por el proveedor de los motores.

### 3) Recorrido por chimenea individual motor

Este recorrido es utilizado cuando los gases se desvían directamente a atmósfera sin pasar por el colector. Esto puede ser debido a la existencia de un alto riesgo de explosión en el colector por una mala combustión en los motores.

- Pérdida lineal

$$\varepsilon \text{ (rugosidad relativa)} = \frac{e \text{ (mm)}}{d \text{ (mm)}} = \frac{0,06}{500} = 1,2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{GE}^{T,p} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot d [\text{m}]}{\mu \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = \frac{0,51 \cdot 26,48 \cdot 0,5}{3,51 \cdot 10^{-5}} = 1,9 \cdot 10^5$$

$$\lambda = 0,017$$

$$\begin{aligned} \Delta h_l &= \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,017 \cdot \frac{(5,5 + 6)}{0,5} \cdot \frac{26,48^2}{2 \cdot 9,8} = 13,99 \text{ mcf} = \\ &= 13,99 [\text{mcf}] \cdot 0,51 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \frac{1}{100} = 0,70 \text{ mbar} \end{aligned}$$

- Pérdida singular

La pérdida singular que actúa en este tramo es la del silenciador y el divérter. Según especificaciones del proveedor éstas son:



$$\Delta h_{s1}(\text{silenciador}) = 10 \text{ mbar}$$

$$\Delta h_{s2}(\text{divérter}) = 2,4 \text{ mbar}$$

Con las pérdidas de cada tramo calculadas se obtiene la pérdida de carga total del recorrido 3):

$$\Delta h_{T3} = \Delta h_l + \Delta h_{s1} + \Delta h_{s2} = 0,7 + 10 + 2,4 = 13,1 \text{ mbar}$$

Como se puede observar, la pérdida de carga de los gases de escape en el recorrido 3) es menor que los 60 mbar recomendados por el proveedor de los motores.



## A.5 Cálculo de la Presión Máxima en el colector

Para el cálculo de la sobrepresión se utilizará el método detallado en *Les Explosifs Occasionnels* (ver referencia [1] de la bibliografía de la memoria), cogiendo un Gas de Síntesis de composición igual al utilizado para el cálculo de los caudales de escape.

Partiendo de los datos de diseño del Gas de síntesis, se calcula el caudal de cada componente referenciado a Condiciones Normales:

$$Q_{GS}^{CN} = 16310 \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{1}{\rho_{GS}^{CN} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 16310 \cdot \frac{1}{1,11} = 14693,7 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{H_2} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% H_2}{100} = 14693,7 \cdot \frac{12,8}{100} = 1880,8 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{CO_2} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% CO_2}{100} = 14693,7 \cdot \frac{13,4}{100} = 1969 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{O_2} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% O_2}{100} = 14693,7 \cdot \frac{0,2}{100} = 29,4 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{N_2} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% N_2}{100} = 14693,7 \cdot \frac{57,9}{100} = 8507,6 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{CH_4} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% CH_4}{100} = 14693,7 \cdot \frac{10,4}{100} = 1528,1 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{C_2H_4} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% C_2H_4}{100} = 14693,7 \cdot \frac{1}{100} = 146,9 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{CO} = Q_{GS}^{CN} \cdot \frac{\% CO}{100} = 14693,7 \cdot \frac{4,3}{100} = 631,8 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{H_2O} = Q_{H_2O} \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 1092,8 \cdot \frac{1}{980} = 1,1 \frac{m^3}{h} \cong 0 \frac{m^3}{h}$$

Debido a la poca relevancia que tiene el  $C_2H_4$  en la sobrepresión producida en el colector es despreciable frente al resto y de este modo se simplifica la reacción de combustión (global). La misma consideración se realiza para el 0,2% de  $O_2$  del Gas de Síntesis frente al  $O_2$  del aire de admisión, o con el caudal de agua frente al resto.

Con los caudales de aire de admisión calculados en el ANEXO A.1 (referenciándolos a Condiciones Normales) se calcula la composición volumétrica de la mezcla antes de la combustión en los motores:



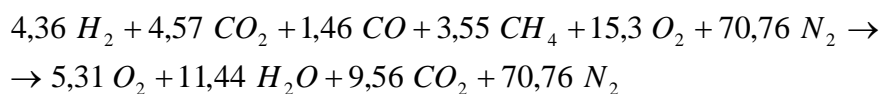
$$Q_{O_2} = Q_{O_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{1}{\rho_{O_2}^{CN} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 9448,05 \cdot \frac{1}{1,43} = 6607 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{N_2} = Q_{O_2} \left[ \frac{kg}{h} \right] \cdot \frac{1}{0,23} \cdot 0,77 = 6607 \cdot \frac{1}{0,23} \cdot 0,77 = 22119,1 \frac{m^3}{h}$$

	Q <sub>GS</sub> + aire (m <sup>3</sup> /h)	% (Vol.) GS + aire
H <sub>2</sub>	<b>1880,8</b>	<b>4,36</b>
CO <sub>2</sub>	<b>1969,0</b>	<b>4,57</b>
O <sub>2</sub>	<b>6607,0</b>	<b>15,30</b>
N <sub>2</sub>	<b>30538,6</b>	<b>70,76</b>
CH <sub>4</sub>	<b>1528,1</b>	<b>3,55</b>
CO	<b>631,8</b>	<b>1,46</b>
TOTAL	43155,34	100

Tabla A.9 – Composición volumétrica de la mezcla GS + aire admisión

Tomando la estimación de que los gases se comportan como gases ideales en las condiciones de entrada, se puede considerar que la reacción de combustión que tiene lugar es la siguiente:



Suponiendo que la reacción descrita se produce a volumen constante y forma adiabática, se cumple la siguiente expresión:

$$Q_v'(\text{productos} - \text{reactivos}) = \sum_{\text{productos}} E(T_v(K))$$

Donde:





$Q_v'$  : Calor de formación compuestos inorgánicos a 18 °C

$E$  : Diferencia de energía interna de los diferentes gases, producto de la reacción, entre 291 K (18 °C) y  $T_v$  (K)

$T_v$  : Temperatura después de la combustión

- $Q_v'$

Para el cálculo del Calor de Formación a 18 °C se extraen las entalpías de formación a dicha temperatura de las *Taules i Gràfiques de propietats Termodinàmiques* (ver referencia [2] de la bibliografía de la memoria).

$$Q_{v\ H_2O}' = n_{H_2O} \cdot h_{H_2O}(291) \left[ \frac{kJ}{mol} \right] = 11,44 \cdot 242,07 = 2769,28\ kJ$$

$$Q_{v\ O_2}' \cong Q_{v\ H_2}' \cong Q_{v\ N_2}' \cong 0\ kJ$$

$$Q_{v\ CO_2}' = (n_{1\ H_2O} - n_{2\ H_2O}) \cdot h_{H_2O}(291) \left[ \frac{kJ}{mol} \right] = (9,56 - 4,57) \cdot 393,76 = 1964,76\ kJ$$

$$Q_{v\ CO}' = n_{CO} \cdot h_{CO}(291) \left[ \frac{kJ}{mol} \right] = 1,46 \cdot 110,74 = 161,68\ kJ$$

$$Q_{v\ CH_4}' = n_{CH_4} \cdot h_{CH_4}(291) \left[ \frac{kJ}{mol} \right] = 3,54 \cdot 74,84 = 264,93\ kJ$$

$$Q_v' (productos - reactivos) = Q_{v\ H_2O}' + Q_{v\ CO_2}' - Q_{v\ CO}' - Q_{v\ CH_4}' = 2769,28 + 1964,76 + (-161,68 - 264,93) = 4307,43\ kJ$$

- Cálculo  $T_v$

Para el cálculo de la presión interna máxima es necesario determinar la temperatura que se alcanza después de la combustión. Para ello (teniendo en cuenta la condición que se cumple para la reacción de combustión), se toman dos temperaturas, tal que, el cálculo de  $E(T)$  queden una superior y otra inferior al  $Q_v'(T_v)$  calculado. De esta manera, interpolando entre las dos temperaturas se obtiene la  $T_v$ .

Para el cálculo de la diferencia de la energía interna se extraen las energías internas de los diferentes productos a las temperaturas consideradas.



Se toma  $T_1 = 1800 \text{ K}$  y  $T_2 = 1900 \text{ K}$  :

$$\begin{aligned} \sum_{\text{productos}} E(T_1) &= n_{O_2} \cdot (u_{O_2}(1800) - u_{O_2}(291)) + n_{H_2O} \cdot (u_{H_2O}(1800) - u_{H_2O}(291)) + \\ &+ n_{CO_2} \cdot (u_{CO_2}(1800) - u_{CO_2}(291)) + n_{N_2} \cdot (u_{N_2}(1800) - u_{N_2}(291)) = \\ &= 5,31 \cdot (45,38 - 5,88) + 11,44 \cdot (57,10 - 7,04) + 9,56 \cdot (74,26 - 6,84) + 70,76 \cdot (42,53 - 5,88) = \\ &= 4020,32 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{\text{productos}} E(T_2) &= n_{O_2} \cdot (u_{O_2}(1900) - u_{O_2}(291)) + n_{H_2O} \cdot (u_{H_2O}(1900) - u_{H_2O}(291)) + \\ &+ n_{CO_2} \cdot (u_{CO_2}(1900) - u_{CO_2}(291)) + n_{N_2} \cdot (u_{N_2}(1900) - u_{N_2}(291)) = \\ &= 5,31 \cdot (48,31 - 5,88) + 11,44 \cdot (61,16 - 7,04) + 9,56 \cdot (79,49 - 6,84) + 70,76 \cdot (45,26 - 5,88) = \\ &= 4325,50 \end{aligned}$$

Una vez realizados los cálculos y observando la figura A.8 se define la temperatura después de la combustión:

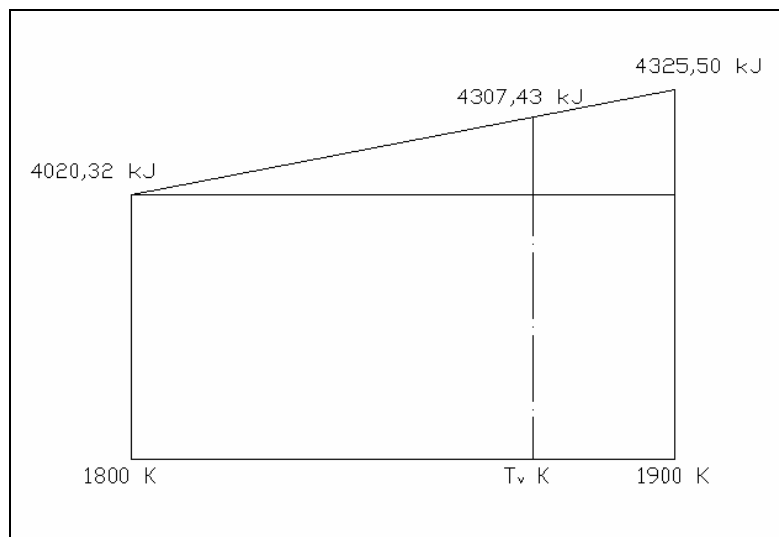


Imagen A.8 – Diagrama de interpolación

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{\text{productos}} E(1900) - \sum_{\text{productos}_1} E(1800)}{T_2 - T_1} &= \frac{Q_v'(T_v) - \sum_{\text{productos}_1} E(1800)}{T_v - T_1} \\ \frac{4325,50 - 4020,32}{1900 - 1800} &= \frac{4307,43 - 4020,32}{T_v - 1800} \\ T_v &= \frac{4307,43 - 4020,32}{4325,50 - 4020,32} \cdot 100 + 1800 = 1894,1 \text{ K} \end{aligned}$$



Finalmente, para el cálculo de la sobrepresión debido a una explosión en el colector, se utiliza la fórmula:

$$\frac{p_f}{p_i} = \frac{n_f}{n_i} \cdot \frac{T_v}{T_i} = \frac{97,07}{100} \cdot \frac{1894,1}{291} = 6,32$$

Donde:

$p_f/p_i$ : Relación entre presión inicial y presión después de la explosión.

$n_f/n_i$ : Relación entre los moles de los reactivos y de los productos.

$T_v/T_i$ : Relación entre la temperatura considerada antes de la explosión y la alcanzada después de la explosión.

Aunque este valor puede variar algo en función de la composición del Gas de Síntesis, el cálculo realizado indica que se dimensionarán los conductos para picos de presión interna de 7 bar.

También cabe destacar que el método empleado, extraído de *Les Explosifs Occasionnels* (ver referencia [1] de la bibliografía de la memoria), supone que la reacción se produce a volumen constante y en recipiente cerrado y de forma esférica, lo cual indica que siendo el colector un conducto abierto a atmósfera y de forma cilíndrica, con longitud mucho mayor al diámetro, cabrá esperar sobrepresiones menores.



## A.6 Cálculo de espesores

Para el cálculo de los espesores de los diferentes tramos del colector, se utilizará la fórmula extraída de la DIN 2413, teniendo en cuenta la presión interna máxima obtenida en el anexo A.5. Dicha expresión contempla el cálculo de un espesor teórico más unos suplementos que tienen en cuenta las tolerancias y la corrosión que experimenta el conducto:

$$e = e_T + e_1 + e_2 = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_S}{\upsilon \cdot R_e} + e_1 + e_2$$

Donde:

D (mm): Diámetro del tramo correspondiente

$p_i$  (Pa): Presión interna (máxima)

$$p_i = 7 \text{ bar} = 7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$\upsilon$ : Calidad de la costura de soldadura

$R_e$  (Pa): Límite elástico del material a  $T = 463 \text{ }^\circ\text{C}$

$$R_{e \text{ 13CrMo44}} (463 \text{ }^\circ\text{C}) = 19,48 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$R_{e \text{ 13CrMo44}} (160 \text{ }^\circ\text{C}) = 28,67 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$R_{e \text{ 15Mo3}} (463 \text{ }^\circ\text{C}) = 15,48 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$R_{e \text{ 15Mo3}} (160 \text{ }^\circ\text{C}) = 25,67 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$C_S$ : Coeficiente de seguridad

$e_1$  (mm) =  $0,15 \cdot e_T$ : Suplemento para compensar tolerancias

$e_2$  (mm): Suplemento para corrosión y desgaste

Cogiendo un coeficiente de seguridad de 1,7, un suplemento de corrosión para el espesor de 1 mm y con una soldadura longitudinal del tubo controlada con  $\upsilon = 0,8$ , se calculan los espesores correspondientes a tramos diferenciados (cambio de sección), para los



materiales 13CrMo44 y 15Mo3:

- Tramos DN500
  - 13CrMo44

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{500}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 19,48 \cdot 10^5} = 1,91 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 1,91 = 0,29 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 1,91 + 0,29 + 1 = 3,2 \text{ mm} \cong 4 \text{ mm}$$

- 15Mo3

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{500}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 15,48 \cdot 10^5} = 2,4 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 2,4 = 0,36 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 2,4 + 0,36 + 1 = 3,76 \text{ mm} \cong 4 \text{ mm}$$

- Tramos DN800
  - 13CrMo44

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{800}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 19,48 \cdot 10^5} = 3,05 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 3,05 = 0,46 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 3,05 + 0,46 + 1 = 4,51 \text{ mm} \cong 5 \text{ mm}$$

- 15Mo3

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{800}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 15,48 \cdot 10^5} = 3,84 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 3,84 = 0,58 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 3,84 + 0,58 + 1 = 5,42 \text{ mm} \cong 6 \text{ mm}$$



- Tramos DN1300
  - 13CrMo44

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{1300}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 19,48 \cdot 10^5} = 4,96 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 4,96 = 0,74$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 4,96 + 0,74 + 1 = 6,7 \text{ mm} \cong 7 \text{ mm}$$

- 15Mo3

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{1300}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 15,48 \cdot 10^5} = 6,25 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 3,84 = 0,94 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 6,25 + 0,94 + 1 = 8,19 \text{ mm} \cong 9 \text{ mm}$$

- Tramos DN1200
  - 13CrMo44

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{1200}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 28,67 \cdot 10^5} = 3,11 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 3,11 = 0,47 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 3,11 + 0,47 + 1 = 4,58 \text{ mm} \cong 5 \text{ mm}$$

- 15Mo3

$$e_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{p_i \cdot C_s}{\nu \cdot R_e} = \frac{1200}{2} \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 1,7}{0,8 \cdot 25,67 \cdot 10^5} = 3,58 \text{ mm}$$

$$e_1 = 0,15 \cdot e_T = 0,15 \cdot 3,48 = 0,52 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1 \text{ mm}$$

$$e = e_T + e_1 + e_2 = 3,58 + 0,52 + 1 = 5,1 \text{ mm} \cong 6 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta los precios actuales de los dos tipos de acero y la diferencia de espesores obtenida se coge el 13CrMo44.



## A.7 Cálculo del aislamiento del colector

### A.7.1 Cálculo de los espesores del aislamiento

Mediante la aplicación de ecuaciones de transferencia de calor desde el fluido interno al exterior se determinan los diferentes espesores de lana de roca (basados en la norma ENE-EN ISO 12241). Para ello se impone una temperatura superficial de 60 °C extraída de la *Guía técnica para la evaluación y prevención de riesgos relativos a la utilización de equipos de trabajo* (ver referencia [4] de la bibliografía de la memoria) y una temperatura ambiente de 35 °C, seleccionada de los registros de los días más calurosos de la zona (caso desfavorable).

Los modelos de aislante seleccionados previamente al estudio y sus características técnicas son los siguientes:

- Manta Spintex 322-G-70

$T^a$  cara caliente: 463 °C

$T^a$  cara fría: 60 °C

Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,086 W/mK

Densidad ( $\rho$ ): 70 kg/m<sup>3</sup>

- Manta Spintex 342-G-125

$T^a$  cara caliente: 463 °C

$T^a$  cara fría: 60 °C

Conductividad térmica ( $\lambda$ ): 0,068 W/mK

Densidad ( $\rho$ ): 125 kg/m<sup>3</sup>



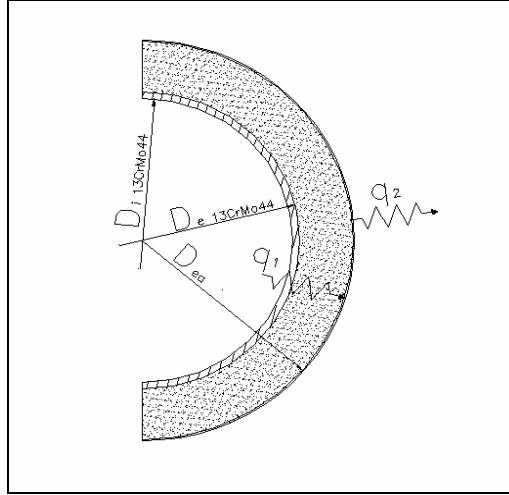


Imagen A.9 – Tránsito de calor en conductos

Observando la figura A.9, se tiene por una parte que la transferencia de calor del fluido interno a la superficie externa del aislante sigue la expresión:

$$q_1 \left[ \frac{W}{m} \right] = \frac{T_{si} - T_{se}}{R} = \frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_j \left[ \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \left( \frac{D_{ej}}{D_{ij}} \right) \right]} = \frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln \left( \frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}} \right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{D_{ia}} \right) \right]}$$

Donde:

$T_{si}(K)$  : Temperatura de la superficie interna (se toma igual a la de los gases de escape).

$T_{se}(K)$  : Temperatura de la superficie externa.

$R$  (mK/W): Resistencia térmica.

$D_{e13CrMo44}$  (m): Diámetro exterior del colector.

$D_{i13CrMo44}$  (m): Diámetro interior del colector.

$\lambda_{13CrMo44}$  (W/mK): Conductividad térmica del colector.

$D_{ea}$  (m): Diámetro exterior del aislamiento.

$D_{ia}$  (m): Diámetro interior del aislamiento.

$\lambda_a$  (W/mK): Conductividad térmica del aislamiento.





Por otra parte, y teniendo en cuenta la convección, se calcula la transferencia de calor que tiene lugar entre la superficie externa y el ambiente ( $q_2$ ):

$$q_1 \left[ \frac{W}{m} \right] = \frac{T_{se} - T_a}{R'} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{(h_{er} + h_{ecv}) \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

Donde:

$T_{se}$  (K): Temperatura de la superficie externa.

$T_a$  (K): Temperatura ambiente.

$R'$  (mK/W): Resistencia térmica.

$D_{ea}$  (m): Diámetro exterior del aislamiento.

$H_e$  (W/m<sup>2</sup>K): Coeficiente superficial de transferencia de calor. Este coeficiente depende de si el conducto es vertical u horizontal así como si está en el interior o exterior de un edificio, y por lo tanto, variará en función del tramo del colector.

$H_{er}$  (W/m<sup>2</sup>K): Coeficiente superficial de transferencia de calor debido a la radiación.

$H_{ecv}$  (W/m<sup>2</sup>K): Coeficiente superficial de transferencia de calor debido a la convección.

Independientemente del tramo de estudio, se cumple que la transferencia de calor desde el interior del conducto hasta la superficie del aislamiento debe ser igual a la producida desde dicha superficie al ambiente. Esto es:

$$q_1 = q_2$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln \left( \frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}} \right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{D_{ia}} \right) \right] = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{(h_{er} + h_{ecv}) \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

Por lo tanto, imponiendo esta relación para los diferentes tramos se obtienen los espesores correspondientes a los dos aislantes seleccionados, para una temperatura



superficial de 60 °C:

- Tramo motor

Al tratarse de un tramo del colector ubicado en el interior del edificio y verticalmente, el cálculo del coeficiente superficial de transferencia de calor sigue:

$$a_r \text{ (factor de temperatura)} = \frac{T_{se}^4 - T_a^4}{T_{se} - T_a} = \frac{333^4 - 308^4}{333 - 308} = 31887673 \text{ K}^3$$

$$c_r \text{ (coeficiente de radiación)} = \varepsilon \text{ (emisividad)} \cdot \sigma \text{ (constante de Boltzman)} = 0,26 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 14,74 \cdot 10^{-9} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \text{ (emisividad correspondiente a chapa de acero galvanizado)}$$

$$h_{er} = a_r \cdot c_r = 31887673 \cdot 14,742 \cdot 10^{-9} = 0,47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Para el cálculo de  $h_{ecv}$  es necesario distinguir el régimen del flujo:

$$D_{e13CrMo44}^3 \cdot \Delta T = 508 \cdot 10^{-3} \cdot (333 - 308) = 12,7 \text{ m}^3 \cdot \text{K} > 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K} \Rightarrow \text{Turbulento}$$

Entonces se calcula según:

$$h_{ecv} = 1,74 \cdot \sqrt[3]{\Delta T} = 1,74 \cdot \sqrt[3]{333 - 308} = 5,09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Por lo tanto:

$$h_e = h_{er} + h_{ecv} = 0,47 + 5,09 = 5,56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

- Manta Spintex 342-G-125

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln \left( \frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}} \right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{D_{ia}} \right) \right] = \frac{T_{se} - T_a}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$



$$\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{0,508}\right) \right] = \frac{736 - 333}{5,56 \cdot \pi \cdot D_{ea}} = \frac{333 - 308}{5,56 \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 0,821 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,821 - 0,508}{2} = 0,156 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 170 \text{ mm}$$

▪ Manta Spintex 322-G-70

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right] = \frac{T_{si} - T_{se}}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} = \frac{T_{se} - T_a}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,086} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{0,508}\right) \right] = \frac{736 - 333}{5,56 \cdot \pi \cdot D_{ea}} = \frac{333 - 308}{5,56 \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 0,8897 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,8897 - 0,508}{2} = 0,190 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 200 \text{ mm}$$

- Tramo silenciador – divérter DN500/divérter DN500 – colector

En este caso se trata de un tramo de colector situado en el exterior (en la terraza superior de la nave) y ubicado de forma horizontal. En estas condiciones el coeficiente superficial de transferencia de calor se calcula:

$$a_r (\text{factor de temperatura}) = \frac{T_{se}^4 - T_a^4}{T_{se} - T_a} = \frac{333^4 - 308^4}{333 - 308} = 31887673 \text{ K}^3$$

$$c_r (\text{coeficiente de radiación}) = \varepsilon (\text{emisividad}) \cdot \sigma (\text{constante de Boltzman}) = 0,26 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} =$$



$$= 14,74 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \text{ (emisividad correspondiente a chapa de acero galvanizado)}$$

$$h_{er} = a_r \cdot c_r = 31887673 \cdot 14,742 \cdot 10^{-9} = 0,47 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para el cálculo de  $h_{ecv}$  es necesario distinguir el régimen del flujo (se coge velocidad del viento 2 m/s):

$$vD_{e13CrMo44} = 2 \cdot 0,508 = 1,016 > 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \Rightarrow \text{Turbulento}$$

Entonces se calcula según:

$$h_{ecv} = 8,9 \cdot \frac{v^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = 8,9 \cdot \frac{2^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Por lo tanto:

$$h_e = h_{er} + h_{ecv} = 0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Introduciendo el coeficiente (en función del diámetro exterior del aislamiento) en la expresión de transferencia de calor, se calcula el espesor para cada tipo de aislamiento:

▪ Manta Spintex 342-G-125

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

$$\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{0,508}\right) \right]} = \frac{333 - 308}{\left(0,47 + \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:



$$D_e = 0,619 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,619 - 0,508}{2} = 0,055 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 60 \text{ mm}$$

▪ Manta Spintex 322-G-70

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

$$\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,086} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{0,508}\right) \right]} = \frac{333 - 308}{\left(0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 0,646 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,646 - 0,508}{2} = 0,069 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 80 \text{ mm}$$

• Tramo colector DN800

Se trata de un tramo de colector situado en el exterior (en la terraza superior de la nave) y ubicado de forma horizontal. En estas condiciones el coeficiente superficial de transferencia de calor se calcula:

$$a_r (\text{factor de temperatura}) = \frac{T_{se}^4 - T_a^4}{T_{se} - T_a} = \frac{333^4 - 308^4}{333 - 308} = 31887673 \text{ K}^3$$

$$c_r (\text{coeficiente de radiación}) = \varepsilon (\text{emisividad}) \cdot \sigma (\text{constante de Boltzman}) = 0,26 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} =$$

$$= 14,74 \cdot 10^{-9} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} (\text{emisividad correspondiente a chapa de acero galvanizado})$$

$$h_{er} = a_r \cdot c_r = 31887673 \cdot 14,742 \cdot 10^{-9} = 0,47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Para el cálculo de  $h_{ecv}$  es necesario distinguir el régimen del flujo (se coge velocidad del viento 2 m/s):



$$vD_{e13CrMo44} = 2 \cdot 0,800 = 1,6 > 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \Rightarrow \text{Turbulento}$$

Entonces se calcula según:

$$h_{ecv} = 8,9 \cdot \frac{v^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = 8,9 \cdot \frac{2^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Por lo tanto:

$$h_e = h_{er} + h_{ecv} = 0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Introduciendo el coeficiente (en función del diámetro exterior del aislamiento) en la expresión de transferencia de calor, se calcula el espesor para cada tipo de aislamiento:

- Manta Spintex 342-G-125

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln \left( \frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}} \right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{D_{ia}} \right) \right]} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

$$\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln \left( \frac{0,810}{0,800} \right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{0,810} \right) \right]} = \frac{333 - 308}{\frac{1}{\left( 0,47 + \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}} \right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 0,929 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,929 - 0,810}{2} = 0,059 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 70 \text{ mm}$$

- Manta Spintex 322-G-70

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:



$$\frac{\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]}} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

$$\frac{\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,810}{0,800}\right) + \frac{1}{0,086} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{0,810}\right) \right]}} = \frac{333 - 308}{\frac{1}{\left(0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 0,959 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{0,959 - 0,810}{2} = 0,074 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 80 \text{ mm}$$

- Tramo colector DN1300

Como en el caso anterior, se trata de un tramo de colector situado en el exterior (en la terraza superior de la nave) y ubicado de forma horizontal. En estas condiciones el coeficiente superficial de transferencia de calor se calcula:

$$a_r \text{ (factor de temperatura)} = \frac{T_{se}^4 - T_a^4}{T_{se} - T_a} = \frac{333^4 - 308^4}{333 - 308} = 31887673 \text{ K}^3$$

$$c_r \text{ (coeficiente de radiación)} = \varepsilon \text{ (emisividad)} \cdot \sigma \text{ (constante de Boltzman)} = 0,26 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} =$$

$$= 14,74 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \text{ (emisividad correspondiente a chapa de acero galvanizado)}$$

$$h_{er} = a_r \cdot c_r = 31887673 \cdot 14,742 \cdot 10^{-9} = 0,47 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para el cálculo de  $h_{ecv}$  es necesario distinguir el régimen del flujo (se coge velocidad del viento 2 m/s):

$$vD_{e13CrMo44} = 2 \cdot 1,3 = 2,6 > 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \Rightarrow \text{Turbulento}$$

Entonces se calcula según:

$$h_{ecv} = 8,9 \cdot \frac{v^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = 8,9 \cdot \frac{2^{0,9}}{D_{ea}^{0,1}} = \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$



Por lo tanto:

$$h_e = h_{er} + h_{ecv} = 0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Introduciendo el coeficiente (en función del diámetro exterior del aislamiento) en la expresión de transferencia de calor, se calcula el espesor para cada tipo de aislamiento:

▪ Manta Spintex 342-G-125

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$

$$\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{1,314}{1,300}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{1,314}\right) \right]} = \frac{333 - 308}{\left(0,47 + \frac{16,61}{D_{ea}^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 1,441 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{1,441 - 1,314}{2} = 0,063 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 70 \text{ mm}$$

▪ Manta Spintex 322-G-70

Imponiendo la igualdad de transferencia de calor y con los datos técnicos del aislante se tiene:

$$\frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]} = \frac{T_{se} - T_a}{\frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}}}$$





$$\frac{736 - 333}{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{1,314}{1,300}\right) + \frac{1}{0,086} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{1,314}\right) \right]} = \frac{333 - 308}{\left(0,47 + \frac{16,61}{D_e^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot D_{ea}}$$

Resolviendo la ecuación iterativamente, se encuentra el diámetro exterior del aislamiento:

$$D_e = 1,473 \text{ m} \Rightarrow e = \frac{1,473 - 1,314}{2} = 0,079 \text{ m} \rightarrow e_{70} = 90 \text{ mm}$$



### A.7.2 Cálculo de la Caída de Temperatura

Habiendo calculado los diferentes espesores de aislamiento para Manta Spintex 342-G-125, se calcula la caída de temperatura de los gases de escape, que tiene lugar desde el motor más alejado de la caldera hasta llegar a ésta. Esto se realiza siguiendo la fórmula (ENE-EN ISO 12241):

$$|T_{fm} - T_a| = |T_{im} - T_a| \cdot e^{-\frac{U_l \cdot l}{\dot{m} \cdot C_p}}$$

Donde:

$T_{fm}$  (K): Temperatura media final del fluido

$T_{im}$  (K): Temperatura media inicial del fluido

$T_a$  (K): Temperatura ambiente

$C_p$  (J/kg·K): Capacidad calorífica del fluido a presión constante. Se calcula la  $C_p$  de los gases de escape en función de la participación de cada componente en el flujo másico del conjunto, extrayendo la  $C_p$  individual de cada componente de *Taules i gràfiques de propietats termodinàmiques* (ver referencia [2] de la bibliografía de la memoria).

$\dot{m}$  (kg/s): Flujo másico. Se calcula siguiendo la fórmula:

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE} \cdot A_c$$

Donde:

$u_m$  (m/s): Velocidad de flujo

$\rho_{GE}$  (kg/m<sup>3</sup>): Densidad de los gases de escape

$A_c$  (m<sup>2</sup>): Sección transversal de paso del fluido

$l$  (m): Longitud del tramo de colector

$U_l$  (W/m·K): Transmitancia térmica lineal. Debido a la magnitud del coeficiente de



convección interior no se tiene en cuenta el componente de resistencia térmica correspondiente, quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\frac{1}{U_l} &= \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_j \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln\left(\frac{D_{ej}}{D_{ij}}\right) = \\ &= \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right]\end{aligned}$$

Para ello se distingue entre los tramos donde se produce alguna variación de algún parámetro de la expresión de la caída de temperatura.

- Tramo motor

En este tramo como se ha calculado en el anexo A.7.1, el diámetro del exterior es:

$$D_{ea} = D_{e13CrMo44} + 2 \cdot e_a = 0,508 + 2 \cdot 0,17 = 0,848 \text{ m}$$

#### 1) Cálculo de $C_p$

Suponiendo el comportamiento de Gas Ideal, se calcula la  $C_p$  realizando una media ponderada, utilizando los caudales másicos, de la  $C_p$  de los gases que componen los gases de escape a la temperatura de 463 °C (mediante *Taules i gràfiques de propietats Termodinàmiques* (ver referencia [2] de la bibliografía de la memoria)):

$$C_p(736 \text{ K})_{H_2O} = 34,86 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{18 \text{ kg}} = 1936,67 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$C_p(736 \text{ K})_{CO_2} = 43,38 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{44 \text{ kg}} = 985,91 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$C_p(736 \text{ K})_{O_2} = 30,72 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{32 \text{ kg}} = 960 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$C_p(736 \text{ K})_{N_2} = 29,45 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{28 \text{ kg}} = 1051,71 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\begin{aligned}C_p(736 \text{ K})_{GE} &= \sum_j \frac{Q_j}{Q_{GE}} \cdot C_p(736 \text{ K})_j = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{GE}} \cdot C_p(736 \text{ K})_{H_2O} + \frac{Q_{CO_2}}{Q_{GE}} \cdot C_p(736 \text{ K})_{CO_2} + \\ &+ \frac{Q_{O_2}}{Q_{GE}} \cdot C_p(736 \text{ K})_{O_2} + \frac{Q_{N_2}}{Q_{GE}} \cdot C_p(736 \text{ K})_{N_2} = \frac{5296,2}{58948,2} \cdot 1936,67 + \frac{8687,6}{58948,2} \cdot 985,91 +\end{aligned}$$



$$+ \frac{2699,4}{58948,2} \cdot 960 + \frac{42265}{58948,2} \cdot 1051,71 = 1117,32 \frac{J}{kg \cdot K}$$

## 2) Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_M \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_M^2}{4} = 26,48 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 2,65 \frac{kg}{s}$$

## 3) Cálculo de $U_l$ (no se tiene en cuenta el coeficiente de resistencia térmica interior)

$$\frac{1}{U_l} = \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right] = \frac{1}{5,56 \cdot \pi \cdot 0,848} +$$

$$+ \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{0,848}{0,508}\right) \right] = 1,267 \frac{m \cdot K}{W} \Rightarrow U_l = 0,789 \frac{W}{m \cdot K}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:

$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_l \cdot l}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (736 - 308) \cdot e^{\frac{-0,789}{2,65 \cdot 1117,32} \cdot 3,85} + 308 = 735,56 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 736 - 735,56 = 0,44 \text{ K}$$

- Tramo silenciador – divérter DN500/divérter DN500 – colector

En este tramo como se ha calculado en el anexo A.7.1, el diámetro del exterior es:

$$D_{ea} = D_{e13CrMo44} + 2 \cdot e_a = 0,508 + 2 \cdot 0,06 = 0,628 \text{ m}$$

El punto 1) y 2), es decir, el cálculo de la  $C_p$  y del flujo másico, son iguales que en el tramo motor y por tanto solo es necesario el cálculo de la transmitancia térmica:

## 3) Cálculo de $U_l$ (no se tiene en cuenta el coeficiente de resistencia térmica interior)



$$\begin{aligned}
\frac{1}{U_l} &= \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right] = \\
&= \frac{1}{\left(0,47 + \frac{16,61}{0,628^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot 0,628} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,508}{0,500}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{0,628}{0,508}\right) \right] = \\
&= 0,525 \frac{m \cdot K}{W} \Rightarrow U_l = 1,9 \frac{W}{m \cdot K}
\end{aligned}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:

$$\begin{aligned}
T_{fm} &= (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_l \cdot l}{m \cdot C_p}} + T_a = (735,56 - 308) \cdot e^{\frac{-1,9}{2,65 \cdot 1117,32} (2 \cdot 0,59)} + 308 = 735,24 \text{ K} \\
\Delta T &= T_{im} - T_{fm} = 735,56 - 735,24 = 0,32 \text{ K}
\end{aligned}$$

- Tramo colector 1 (desde la entrada del caudal del primer motor hasta la entrada del segundo)

En este tramo como se ha calculado en el anexo A.7.1, el diámetro del exterior es:

$$D_{ea} = D_{e13CrMo44} + 2 \cdot e_a = 0,810 + 2 \cdot 0,07 = 0,95 \text{ m}$$

La  $C_p$  se toma la misma que a 736 K y el flujo másico se conserva (aumenta la sección pero disminuye la velocidad), por lo tanto se debe recalcular la transmitancia térmica:

- 3) Cálculo de  $U_l$  (no se tiene en cuenta el coeficiente de resistencia térmica interior)

$$\begin{aligned}
\frac{1}{U_l} &= \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln\left(\frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}}\right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{D_{ea}}{D_{ia}}\right) \right] = \\
&= \frac{1}{\left(0,47 + \frac{16,61}{0,95^{0,1}}\right) \cdot \pi \cdot 0,95} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln\left(\frac{0,810}{0,800}\right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln\left(\frac{0,950}{0,810}\right) \right] = \\
&= 0,39 \frac{m \cdot K}{W} \Rightarrow U_l = 2,55 \frac{W}{m \cdot K}
\end{aligned}$$



Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:

$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_{l-l}}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (735,24 - 308) \cdot e^{\frac{-2,55}{2,65 \cdot 1117,32} \cdot 4,5} + 308 = 733,59 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 735,24 - 733,59 = 1,65 \text{ K}$$

- Tramo colector 2 (desde la entrada del caudal del segundo motor hasta la entrada del tercero)

En este caso se coge la  $C_p(736 \text{ K})$  y la transmitancia térmica es la misma que en el tramo anterior.

## 2) Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_{c2} \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_{c1}^2}{4} = 20,69 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} = 5,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:

$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_{l-l}}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (733,59 - 308) \cdot e^{\frac{-2,55}{5,3 \cdot 1117,32} \cdot 4,5} + 308 = 732,77 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 733,59 - 732,77 = 0,82 \text{ K}$$

- Tramo colector 3 (desde la entrada del caudal del tercer motor hasta la entrada del cuarto)

En este caso se coge la  $C_p(736 \text{ K})$  y la transmitancia térmica es la misma que en el tramo anterior.

## 2) Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_{c3} \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_{c1}^2}{4} = 31,03 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} = 7,95 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se



tiene:

$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_l \cdot l}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (732,77 - 308) \cdot e^{\frac{-2,55}{7,95 \cdot 1117,32} \cdot 4,5} + 308 = 732,22 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 732,77 - 732,22 = 0,55 \text{ K}$$

- Tramo colector 4 (desde la entrada del caudal del cuarto motor hasta la entrada del quinto)

En este tramo como se ha calculado en el anexo A.7.1, el diámetro del exterior es:

$$D_{ea} = D_{e13CrMo44} + 2 \cdot e_a = 1,314 + 2 \cdot 0,07 = 1,454 \text{ m}$$

Tomando la  $C_p$  de 736 K se calculan de nuevo el flujo másico y la transmitancia térmica.

## 2) Cálculo de flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_{c4} \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ec}^2}{4} = 15,67 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 1,3^2}{4} = 10,61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

## 3) Cálculo de $U_l$ (no se tiene en cuenta el coeficiente de resistencia térmica interior)

$$\frac{1}{U_l} = \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_{ea}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{13CrMo44}} \cdot \ln \left( \frac{D_{e13CrMo44}}{D_{i13CrMo44}} \right) + \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{D_{ea}}{D_{ia}} \right) \right] =$$

$$\frac{1}{\left( 0,47 + \frac{16,61}{1,454^{0,1}} \right) \cdot \pi \cdot 1,454} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{34,28} \cdot \ln \left( \frac{1,314}{1,300} \right) + \frac{1}{0,068} \cdot \ln \left( \frac{1,454}{1,314} \right) \right] =$$

$$= 0,25 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \Rightarrow U_l = 4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:



$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_{l-1}}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (732,22 - 308) \cdot e^{\frac{-4}{10,61 \cdot 1117,32} \cdot 4,5} + 308 = 731,69 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 732,22 - 731,69 = 0,53 \text{ K}$$

- Tramo colector 5 (desde la entrada del caudal del quinto motor hasta la entrada del sexto)

En este caso se coge la  $C_p(736 \text{ K})$  y la transmitancia térmica es la misma que en el tramo anterior.

## 2) Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_{c5} \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ec}^2}{4} = 19,59 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 1,3^2}{4} = 13,26 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:

$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_l}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (731,69 - 308) \cdot e^{\frac{-4}{13,26 \cdot 1117,32} \cdot 4,5} + 308 = 731,17 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 731,69 - 731,17 = 0,52 \text{ K}$$

- Tramo colector 6 (desde la entrada del caudal del sexto motor hasta la entrada de la caldera)

En este caso se coge la  $C_p(736 \text{ K})$  y la transmitancia térmica es la misma que en el tramo anterior.

## 2) Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = u_m \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot A_c = v_{c6} \cdot \rho_{GE}^{463;1,013} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ec}^2}{4} = 23,5 \cdot 0,51 \cdot \frac{\pi \cdot 1,3^2}{4} = 15,91 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Introduciendo los parámetros calculados a la expresión de caída de temperatura, se tiene:





$$T_{fm} = (T_{im} - T_a) \cdot e^{\frac{-U_{L,l}}{\dot{m} \cdot C_p}} + T_a = (731,17 - 308) \cdot e^{\frac{-4}{15,91 \cdot 1117,32} \cdot 13,61} + 308 = 729,88 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{im} - T_{fm} = 731,17 - 729,88 = 1,29 \text{ K}$$

Por lo tanto, se tiene que la caída de temperatura total desde el motor más alejado hasta la entrada de los gases de escape a la caldera es:

$$\Delta T_{tot} = \sum_{tramos} \Delta T = 0,44 + 0,32 + 1,65 + 0,82 + 0,55 + 0,53 + 0,52 + 1,29 = 6,12 \text{ K}$$

Ha esta caída de temperatura hay que añadirle un 15% de la misma, debido a la mayor transferencia ocurrida en los soportes, como consecuencia del contacto directo con el colector. Esto es:

$$\Delta T'_{tot} = \Delta T_{tot} \cdot (1 + 0,15) = 7,03 \text{ K}$$



## A.8 Cálculo de dilataciones

Observando las situaciones de los motores, de los equipos que transmiten vibraciones y del cambio de sección, se decide situar las juntas tal como se indica en el esquema siguiente, con los correspondientes puntos fijos y puntos guías que permiten el óptimo funcionamiento de las juntas:

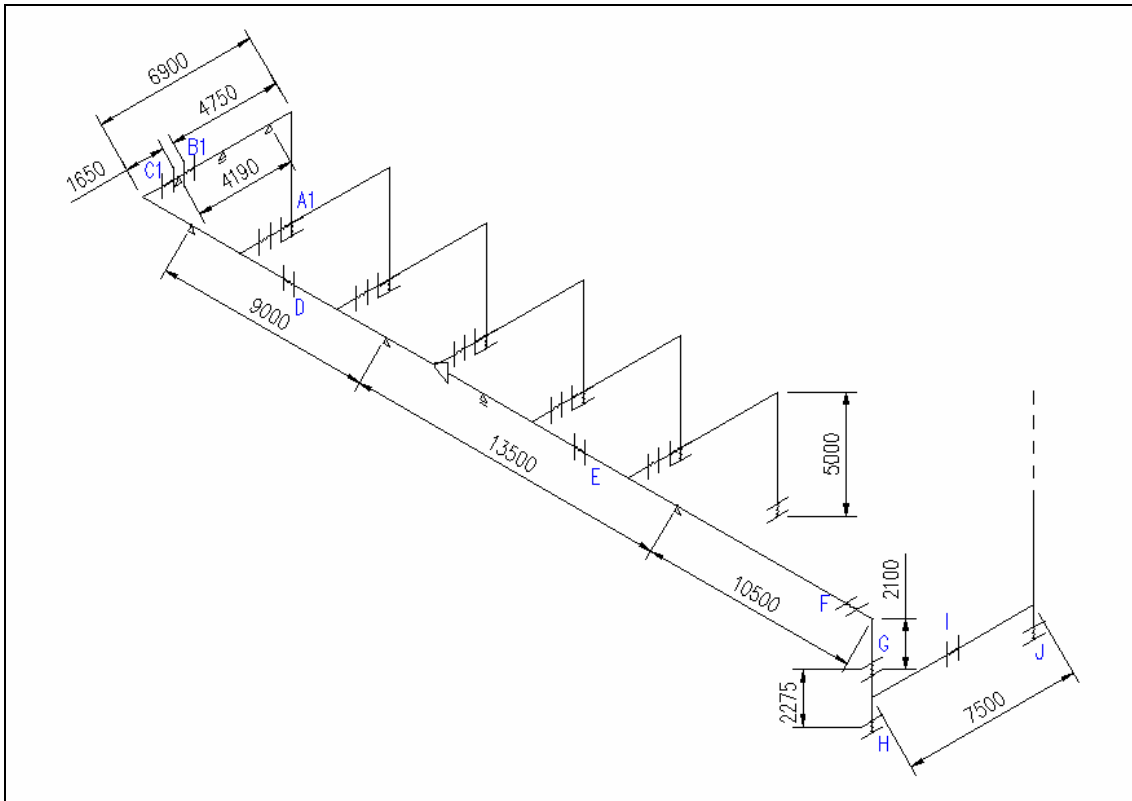


Imagen A.10 – Esquema de distribución de las Juntas de Expansión

Para el cálculo de las deformaciones absorbidas por cada junta, es necesario el cálculo de la dilatación por metro lineal producida en el conducto. Esto se calcula a partir de la dilatación térmica del material 13CrMo44 (DIN 17155), mediante la fórmula siguiente:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T = 13,9 \cdot 10^{-6} \cdot (463 - 20) = 0,00678 \frac{m}{m} = 6,78 \frac{mm}{m}$$

Por lo tanto, la deformación lineal absorbida por las diferentes juntas es:

$$\Delta L_{A1} = \Delta l \cdot L_{A1} = 6,78 \cdot 5 = 33,9 \text{ mm}$$

$$\Delta L_{B1} = \Delta l \cdot L_{B1} = 6,78 \cdot 4,2 = 28,5 \text{ mm}$$



$$\Delta L_{C1} = \Delta l \cdot L_{C1} = 6,78 \cdot 1,67 = 11,3 \text{ mm}$$

$$\Delta L_D = \Delta l \cdot L_D = 6,78 \cdot 9 = 61 \text{ mm}$$

$$\Delta L_E = \Delta l \cdot L_E = 6,78 \cdot 13,5 = 91,5 \text{ mm}$$

$$\Delta L_F = \Delta l \cdot L_F = 6,78 \cdot 6,65 = 71,2 \text{ mm}$$

$$\Delta L_I = \Delta l \cdot L_I = 6,78 \cdot 6,19 = 42 \text{ mm}$$

En cuanto a las Juntas de Expansión G, H y J, solo se encargan de absorber las vibraciones producidas por los equipos a los que están unidas (DIVERTER DN1300 y Caldera).



## A.9 Cálculo de los soportes

### A.9.1 Soportes del tramo motor

Teniendo en cuenta la situación del silenciador, la chimenea, el divérter y la ubicación de las juntas de expansión, se decide una distribución de los soportes guía y los soportes fijos y se comprueba las solicitaciones producidas tanto en el propio conducto como en los soportes seleccionados.

Para ello, se muestra en la imagen A.11 la distribución de los soportes en el tramo, así como las fuerzas que actúan:

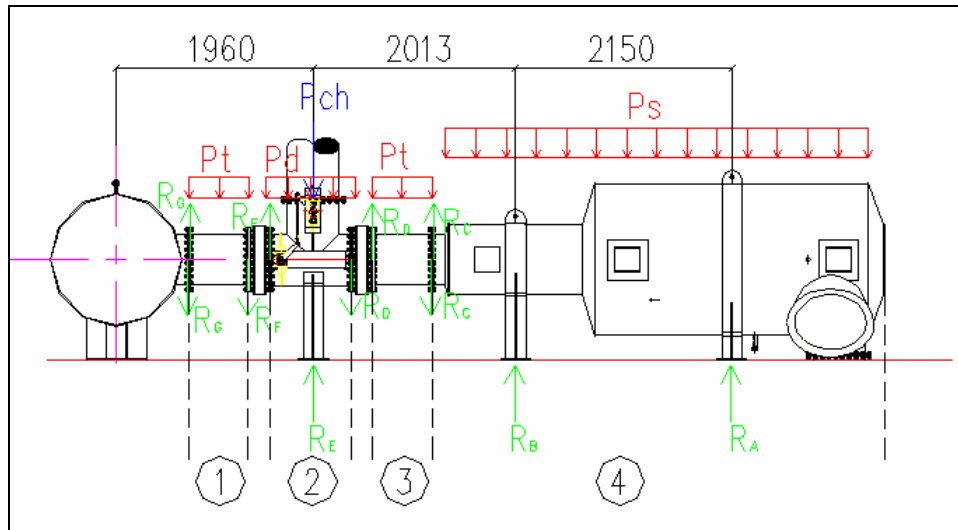


Imagen A.11 – Distribución soportes motor

Cogiendo datos de la especificación de los equipos correspondientes, y de los calculados en anexos anteriores se calculan las solicitaciones por metro lineal del tramo motor:

$$p_s = \frac{P_s}{L_d} = \frac{1230}{4,5} = 273,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ (calorifugado)}$$

$$p_d = \frac{P_d}{L_d} = \frac{70}{1,85} = 37,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ (calorifugado)}$$

$$p_t = p_{13CrMo44} + p_a = A_{13CrMo44} \cdot \rho_{13CrMo44} + A_a \cdot \rho_a = \pi \cdot \frac{(0,508^2 - 0,5^2)}{4} \cdot 7860 +$$

$$+ \pi \cdot \frac{((0,508 + 2 \cdot 0,06)^2 - 0,508^2)}{4} \cdot 125 = 49,78 + 13,38 = 63,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$



$$p_{ch} = A_{ch} \cdot L_{ch} \cdot \rho_{13CrMo44} = \pi \cdot \frac{(0,508^2 - 0,5^2)}{4} \cdot 6 \cdot 7860 = 298,7 \text{ kg}$$

Donde:

$p_s$  (kg/m): peso por metro lineal del silenciador.

$p_d$  (kg/m): peso por metro lineal del divérter.

$p_t$  (kg/m): peso por metro lineal del tramo silenciador – divérter DN500/divérter DN500 – colector.

$p_{13CrMo44}$  (kg/m): peso por metro lineal del 13CrMo44 correspondiente al tramo silenciador – divérter DN500/divérter DN500 – colector.

$p_a$  (kg/m): peso por metro lineal del aislamiento 342-G-125 correspondiente al tramo silenciador – divérter DN500/divérter DN500 – colector.

$p_{ch}$  (kg/m): peso de la chimenea individual de cada motor.

Debido a la presencia de las juntas de expansión y a la rotura de la continuidad que éstas producen, se pueden plantear las ecuaciones de equilibrio para los tres tramos diferenciados en la imagen A.11:

#### Tramo 1

$$\left. \begin{aligned} \sum_i F_{iy} = 0 &\Rightarrow R_G - R_F - p_t \cdot 9,8 \cdot 0,59 = 0 \\ \sum_i M_i(G) &\Rightarrow -p_t \cdot 9,8 \cdot \frac{0,59^2}{2} - R_F \cdot 0,59 = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} R_G &= 63,16 \cdot 9,8 \cdot 0,59 + R_F = 182,6 \text{ N} \\ R_F &= -63,16 \cdot 9,8 \cdot \frac{0,59}{2} \end{aligned}$$

El signo negativo de la fuerza  $R_F$  implica que en realidad actúa en sentido contrario al que se indica en la imagen A.11.

#### Tramo 2

$$\left. \begin{aligned} \sum_i F_{iy} = 0 &\Rightarrow R_F + R_E - p_d \cdot 9,8 \cdot 1,85 - p_{ch} \cdot 9,8 - R_D = 0 \\ \sum_i M_i(F) = 0 &\Rightarrow -p_d \cdot 9,8 \cdot \frac{1,85^2}{2} - p_{ch} \cdot 9,8 \cdot \frac{1,85}{2} + R_E \cdot \frac{1,85}{2} - R_D \cdot 1,85 = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$



$$\begin{aligned}
 R_E &= 182,6 + 37,8 \cdot 9,8 \cdot 1,85 + 298,7 \cdot 9,8 + R_D = 3795,2 + R_D = 3977,8 \text{ N} \\
 \Rightarrow -37,8 \cdot 9,8 \cdot \frac{1,85^2}{2} - 298,7 \cdot 9,8 \cdot \frac{1,85}{2} + (3795,2 + R_D) \cdot \frac{1,85}{2} - R_D \cdot 1,85 &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow R_D &= \frac{-3341,6 + 3795,2 \cdot \frac{1,85}{2}}{\frac{1,85}{2}} = 182,6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

### Tramo 3

$$\begin{aligned}
 \sum_i F_{iy} &= 0 \Rightarrow R_D - p_t \cdot 9,8 \cdot 0,59 - R_C = 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow R_C &= -63,16 \cdot 9,8 \cdot 0,59 + 182,6 = -182,6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

El signo negativo de la fuerza  $R_F$  implica que en realidad actúa en sentido contrario al que se indica en la imagen A.11.

### Tramo 4

$$\left. \begin{aligned}
 \sum_i F_{iy} &= 0 \Rightarrow R_C + R_B + R_A - p_s \cdot 9,8 \cdot 4,5 = 0 \\
 \sum_i M_i(C) &= 0 \Rightarrow -p_s \cdot 9,8 \cdot \frac{4,5^2}{2} + R_B \cdot 0,83 + R_A \cdot 2,98 = 0
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
 R_B &= 182,6 + 273,3 \cdot 9,8 \cdot 4,5 - R_A = 12221,9 - R_A = 4327 \text{ N} \\
 -273,3 \cdot 9,8 \cdot \frac{4,5^2}{2} + (12221,9 - R_A) \cdot 0,83 + R_A \cdot 2,98 &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow R_A &= \frac{27118,2 + 12221,9 \cdot 0,83}{2,98 - 0,83} = 7894,9 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto los resultados de las fuerzas de reacción en los soportes y en las uniones son los que muestra la tabla A.10:

TRAMO 1		TRAMO 2			TRAMO 3		TRAMO 4		
$R_G$ (N)	$R_F$ (N)	$R_F$ (N)	$R_E$ (N)	$R_D$ (N)	$R_D$ (N)	$R_C$ (N)	$R_C$ (N)	$R_B$ (N)	$R_A$ (N)
182,6	-182,6	-182,6	3977,8	182,6	182,6	-182,6	-182,6	4327,0	7894,9

Tabla A.10 – Fuerzas de reacción tramo motor



Una vez calculadas las fuerzas de reacción en los enlaces se analiza la resistencia mecánica del más solicitado, que como se puede observar en la tabla A.10 es el soporte del punto A que tiene una fuerza normal (compresión) de valor 7894,9 N.

Con las especificaciones de los soportes detalladas en el plano MNE-CGE-16 se calcula la sección transversal a la dirección de la fuerza de reacción  $R_A$ :

$$A_c = F \cdot A + 6 \cdot \left( \frac{H - F}{2} \right) \cdot F = 0,01 \cdot 0,7 + 6 \cdot \left( \frac{0,2 - 0,01}{2} \right) \cdot 0,01 = 0,0127 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{compr} = \frac{R_A}{A_s} = \frac{7894,9}{0,0127} = 0,622 \text{ MPa}$$

Como el material de los soportes es 13CrMo44, según DIN 17155, para obtener un 1% de deformación después de 100000 h (11,4 años) de trabajo a una temperatura de 470 °C se toma como límite elástico  $\sigma_e = 151,9 \text{ MPa}$ . Cogiendo entonces como tensión admisible:

$$\sigma_{adm} = 0,7 \cdot \sigma_e = 106,33 \text{ MPa}$$

Con esto y teniendo en cuenta que la disposición de los nervios de los soportes evita el pandeo, se observa que no hay ningún problema de resistencia en los soportes del tramo de motor.



### A.9.2 Soportes del tramo colector general

Teniendo en cuenta la situación de la entrada de motores, el cambio de sección y la ubicación de las juntas de expansión, se decide una distribución de los soportes guía y los soportes fijos y se comprueba las solicitaciones producidas tanto en el propio conducto como en los soportes seleccionados.

Para ello, se muestra en la imagen A.12 la distribución de los soportes en el tramo, así como las fuerzas que actúan:

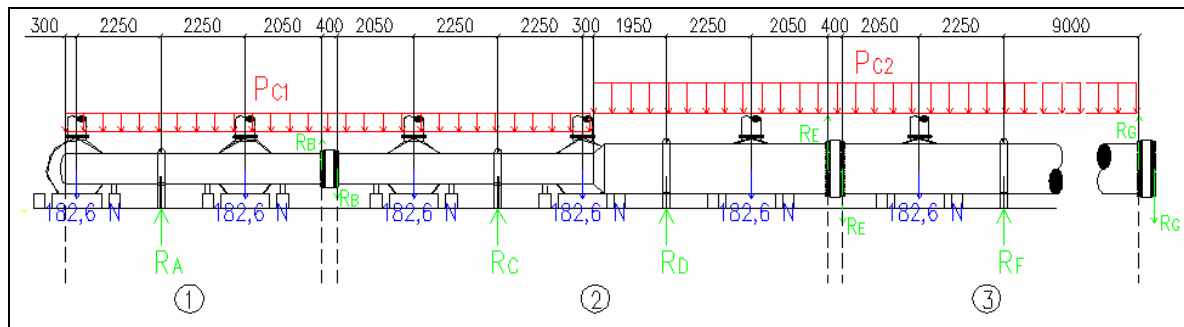


Imagen A.12 – Distribución soportes colector general

Cogiendo datos de los calculados en anexos anteriores se calculan las solicitaciones por metro lineal del tramo motor:

$$\begin{aligned}
 p_{c1} &= p_{13CrMo44} + p_a = A_{13CrMo44} \cdot \rho_{13CrMo44} + A_a \cdot \rho_a = \pi \cdot \frac{(0,81^2 - 0,8^2)}{4} + \\
 &+ \pi \cdot \frac{((0,81 + 2 \cdot 0,07)^2 - 0,8^2)}{4} = 99 + 24,19 = 123,19 \frac{kg}{m} \\
 p_{c2} &= p_{13CrMo44} + p_a = A_{13CrMo44} \cdot \rho_{13CrMo44} + A_a \cdot \rho_a = \pi \cdot \frac{(1,314^2 - 1,3^2)}{4} + \\
 &+ \pi \cdot \frac{((1,314 + 2 \cdot 0,07)^2 - 1,314^2)}{4} = 225,58 + 38,04 = 263,62 \frac{kg}{h}
 \end{aligned}$$

Donde:

$p_{c1}$  (kg/m): peso por metro lineal del tramo colector DN800

$p_{c2}$  (kg/m): peso por metro lineal del tramo colector DN1300

Debido a la presencia de las juntas de expansión y a la rotura de la continuidad que éstas producen, se pueden plantear las ecuaciones de equilibrio para los tres tramos





diferenciados que se muestran en la imagen A.12:

### Tramo 1

$$\left. \begin{aligned} \sum_i F_{iy} = 0 &\Rightarrow R_A + R_B - 2 \cdot 182,6 - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 = 0 \\ \sum_i M_i(O) &\Rightarrow -182,6 \cdot 0,3 - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot \frac{6,85^2}{2} - 182,6 \cdot 4,8 + R_A \cdot 2,55 + R_B \cdot 6,85 = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} R_A &= 2 \cdot 182,6 + 123,19 \cdot 9,8 \cdot 6,85 - R_B = 8634,9 - R_B = 6952,1 \text{ N} \\ \Rightarrow -182,6 \cdot 0,3 - 123,19 \cdot 9,8 \cdot \frac{6,85^2}{2} - 182,6 \cdot 4,8 + (8634,9 - R_B) \cdot 2,55 + R_B \cdot 6,85 &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow R_B &= \frac{54,8 + 28323,9 + 876,5 - 8634,9 \cdot 2,55}{6,85 - 2,55} = 1682,8 \text{ N} \end{aligned}$$

### Tramo 2

$$\left. \begin{aligned} \sum_i F_{iy} = 0 &\Rightarrow -R_B + R_C + R_D + R_E - 3 \cdot 182,6 - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot 6,25 = 0 \\ \sum_i M_i(E) &\Rightarrow R_B \cdot 13,1 - 182,6 \cdot 11,05 - R_C \cdot 8,8 + 182,6 \cdot 6,55 + p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 \cdot 9,675 - \\ &- R_D \cdot 4,3 + 182,6 \cdot 2,05 + p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{6,25^2}{2} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} R_C + R_D + R_E &= 26647 \\ R_B \cdot 13,1 - R_C \cdot 8,8 - R_D \cdot 4,3 &= -134056,3 \end{aligned} \right\}$$

Como se puede observar se tienen para este tramo 2 ecuaciones y 3 fuerzas de reacción a determinar con lo que el sistema de fuerzas queda indeterminado. Con la finalidad de superar dicha indeterminación se considera que la deformación vertical del soporte C y del soporte D son iguales, y las fuerzas de reacción en dichos soportes son proporcionales a ésta deformación. Ésta proporcionalidad viene dada por las constantes de rigidez de los soportes. Es decir:

$$\left. \begin{aligned} R_C &= k_C \cdot \Delta y \\ R_D &= k_D \cdot \Delta y \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{R_C}{R_D} = \frac{k_C}{k_D}$$



Para la determinación de la constante de rigidez de los soportes se utiliza la fórmula extraída de *Quadern CM1, Fallada, Unions, Hertz* (ver referencia [7] de la bibliografía de la memoria):

$$k = \frac{A_s \cdot E_s}{e_s}$$

Donde:

$A_s$  (m<sup>2</sup>): Área del soporte en contacto con el colector

$$A_s = H \cdot \alpha \cdot r$$

Donde:

$H$  (m): Amplitud del soporte en contacto con el colector

$\alpha$  (rad): Ángulo de contacto del soporte con el colector

$r$  (m): Radio exterior del colector

$E_s = 207 \cdot 10^9$  Pa: Módulo de Young del material del soporte

$e_s$  (mm): Espesor de la parte cilíndrica del soporte en contacto con el colector.

Por lo tanto se tiene:

- Soporte C

$$k_c = \frac{A_{sc} \cdot E_s}{e_{sc}} = \frac{H \cdot \alpha \cdot r \cdot E_s}{e_{sc}} = \frac{0,2 \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot 0,405 \cdot 207 \cdot 10^9}{0,005} = 7,02 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

- Soporte D

$$k_c = \frac{A_{sc} \cdot E_s}{e_{sc}} = \frac{H \cdot \alpha \cdot r \cdot E_s}{e_{sc}} = \frac{0,2 \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot 0,657 \cdot 207 \cdot 10^9}{0,007} = 8,14 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Entonces se tiene que la relación entre  $R_c$  y  $R_D$  es:



$$\frac{R_C}{R_D} = \frac{k_C}{k_D} = \frac{7,02 \cdot 10^6}{8,14 \cdot 10^6} = 0,862$$

Con lo que ya queda solucionada la indeterminación:

$$\left. \begin{array}{l} R_C + R_D + R_E = 26647 \\ R_B \cdot 13,1 - R_C \cdot 8,8 - R_D \cdot 4,3 = -134056,3 \\ R_C = 0,862 \cdot R_D \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{array}{l} (0,862 + 1) \cdot R_D + R_E = 26647 \\ 1682,8 \cdot 13,1 - 0,862 \cdot 8,8 \cdot R_D - R_D \cdot 4,3 = -134056,3 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$R_D = \frac{156101}{11,9} = 13117,7 \text{ N}$$

$$\Rightarrow R_E = 26647 - 1,862 \cdot (13117,7) = 2221,8 \text{ N}$$

$$R_C = 0,862 \cdot 13117,7 = 11307,5 \text{ N}$$

### Tramo 3

$$\left. \begin{array}{l} \sum_i F_{iy} = 0 \Rightarrow -R_E - 182,6 + R_F - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot 13,3 + R_G = 0 \\ \sum_i M_i(G) \Rightarrow R_E \cdot 13,3 + 182,6 \cdot 11,25 - R_F \cdot 9 + p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{13,3^2}{2} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$R_G = 2221,8 + 182,6 + 263,62 \cdot 9,8 \cdot 13,3 - R_F = 7864,6 \text{ N}$$

$$\Rightarrow R_F = \frac{2221,8 \cdot 13,3 + 182,6 \cdot 11,25 + 263,62 \cdot 9,8 \cdot \frac{13,3^2}{2}}{9} = 28900 \text{ N}$$

Por lo tanto los resultados de las fuerzas de reacción en los soportes y en las uniones son los que muestra la tabla A.11:

TRAMO 1		TRAMO 2				TRAMO 3		
R <sub>A</sub> (N)	R <sub>B</sub> (N)	R <sub>B</sub> (N)	R <sub>C</sub> (N)	R <sub>D</sub> (N)	R <sub>E</sub> (N)	R <sub>E</sub> (N)	R <sub>F</sub> (N)	R <sub>G</sub> (N)
<b>6952,1</b>	<b>1682,8</b>	<b>1682,8</b>	<b>11308,0</b>	<b>13118,0</b>	<b>2221,8</b>	<b>2221,8</b>	<b>28900,0</b>	<b>7864,6</b>

Tabla A.11 – Fuerzas de reacción colector general



Una vez calculadas las fuerzas de reacción en los enlaces se analiza la resistencia mecánica del más solicitado, que como se puede observar en la tabla A.11 es el soporte del punto F que tiene una fuerza normal (compresión) de valor 28900 N.

Con las especificaciones de los soportes detalladas en el plano MNE-CGE-16 se calcula la sección transversal a la dirección de la fuerza de reacción  $R_A$ :

$$A_c = F \cdot A + 6 \cdot \left( \frac{H - F}{2} \right) \cdot F = 0,01 \cdot 0,6 + 6 \cdot \left( \frac{0,2 - 0,01}{2} \right) \cdot 0,01 = 0,0117 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{compr} = \frac{R_F}{A_s} = \frac{7894,9}{0,0117} = 2,470 \text{ MPa}$$

Como el material de los soportes es 13CrMo44, según DIN 17155, para obtener un 1% de deformación después de 100000 h (11,4 años) de trabajo a una temperatura de 470 °C se toma como límite elástico  $\sigma_e = 151,9 \text{ MPa}$ . Cogiendo entonces como tensión admisible:

$$\sigma_{adm} = 0,7 \cdot \sigma_e = 106,33 \text{ MPa}$$

Con esto y teniendo en cuenta que la disposición de los nervios de los soportes evita el pandeo, se observa que no hay ningún problema de resistencia en los soportes del tramo de motor.



## A.10 Cálculo de resistencia del colector

A partir de los resultados de las fuerzas de reacción realizados en el anexo A.9, se debe calcular la sollicitación a la que trabaja el material del colector en las secciones más críticas.

Para ello se realiza el estudio de los diagramas de las fuerzas tangenciales y momentos flectores. Esto se realizará solo para el colector general, ya que la sollicitación del colector del tramo motor es mucho menor.

Observando la imagen A.12 se calcula la evolución tanto de las fuerzas tangenciales como de los momentos flectores para los diferentes tramos:

### Tramo1

- Fuerza tangencial T (N)

- Para  $0 \text{ m} < x < 0,3 \text{ m}$

$$T(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x$$

- Para  $0,3 \text{ m} < x < 2,55 \text{ m}$

$$T(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6$$

- Para  $2,55 \text{ m} < x < 4,8 \text{ m}$

$$T(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_A$$

- Para  $4,8 \text{ m} < x < 6,85 \text{ m}$

$$T(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_A - 182,6$$

- Para  $x = 6,85 \text{ m}$

$$T(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_A - 182,6 + R_B$$

- Momento flector M (Nm)

- Para  $0 \text{ m} < x < 0,3 \text{ m}$

$$M(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2}$$



- Para  $0,3 \text{ m} < x < 2,55 \text{ m}$

$$M(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 0,3)$$

- Para  $2,55 \text{ m} < x < 4,8 \text{ m}$

$$M(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 0,3) + R_A \cdot (x - 2,55)$$

- Para  $4,8 \text{ m} < x < 6,85 \text{ m}$

$$M(x) = -p_{cl} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 0,3) + R_A \cdot (x - 2,55) - 182,6 \cdot (x - 4,8)$$

## Tramo 2

- Fuerza tangencial T (N)

- Para  $0 \text{ m} < x < 2,05 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x$$

- Para  $2,05 \text{ m} < x < 4,3 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6$$

- Para  $4,3 \text{ m} < x < 6,55 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_C$$

- Para  $6,55 \text{ m} < x < 6,85 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_C - 182,6$$

- Para  $6,85 \text{ m} < x < 8,8 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot 6,85 - 182,6 + R_C - 182,6 - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot (x - 6,85)$$

- Para  $8,8 \text{ m} < x < 11,05 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{cl} \cdot 9,8 \cdot 6,85 - 182,6 + R_C - 182,6 - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot (x - 6,85) + R_D$$



- Para  $11,05 \text{ m} < x < 13,1 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 + -182,6 + R_C - 182,6 - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot (x - 6,85) + R_D - 186,2$$

- Para  $x = 13,1 \text{ m}$

$$T(x) = -R_B - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 + -182,6 + R_C - 182,6 - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot (x - 6,85) + R_D - 186,2 + R_E$$

- Momento flector M (Nm)

- Para  $0 \text{ m} < x < 2,05 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2}$$

- Para  $2,05 \text{ m} < x < 4,3 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 2,05)$$

- Para  $4,3 \text{ m} < x < 6,55 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 2,05) + R_C \cdot (x - 4,3)$$

- Para  $6,55 \text{ m} < x < 6,85 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 2,05) + R_C \cdot (x - 4,3) - 182,6 \cdot (x - 6,55)$$

- Para  $6,85 \text{ m} < x < 8,8 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 \cdot \left( x - \frac{6,85}{2} \right) - 182,6 \cdot (x - 2,05) + R_C \cdot (x - 4,3) - 182,6 \cdot (x - 6,55) - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{(x - 6,85)^2}{2}$$

- Para  $8,8 \text{ m} < x < 11,05 \text{ m}$

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 \cdot \left( x - \frac{6,85}{2} \right) - 182,6 \cdot (x - 2,05) +$$



$$R_C \cdot (x - 4,3) - 182,6 \cdot (x - 6,55) - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{(x - 6,85)^2}{2} + R_D \cdot (x - 8,8)$$

- Para 11,05 m < x < 13,1 m

$$M(x) = -R_B \cdot x - p_{c1} \cdot 9,8 \cdot 6,85 \cdot \left(x - \frac{6,85}{2}\right) - 182,6 \cdot (x - 2,05) +$$

$$R_C \cdot (x - 4,3) - 182,6 \cdot (x - 6,55) - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{(x - 6,85)^2}{2} + R_D \cdot (x - 8,8) +$$

$$- 182,6 \cdot (x - 11,05)$$

### Tramo 3

- Fuerza tangencial T (N)

- Para 0 m < x < 2,05 m

$$T(x) = -R_E - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot x$$

- Para 2,05 m < x < 4,3 m

$$T(x) = -R_E - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6$$

- Para 4,3 m < x < 13,3 m

$$T(x) = -R_E - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_F$$

- Para x = 13,3

$$T(x) = -R_E - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot x - 182,6 + R_F + R_G$$

- Momento flector M (Nm)

- Para 0 m < x < 2,05 m

$$M(x) = -R_E \cdot x - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2}$$

- Para 2,05 m < x < 4,3 m

$$M(x) = -R_E \cdot x - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 2,05)$$





- Para  $4,3 \text{ m} < x < 13,3 \text{ m}$

$$M(x) = -R_E \cdot x - p_{c2} \cdot 9,8 \cdot \frac{x^2}{2} - 182,6 \cdot (x - 2,05) + R_F \cdot (x - 4,3)$$

En la imagen A.13 y A.14 se muestra el resultado de dichos diagramas, con los valores de los puntos más críticos:

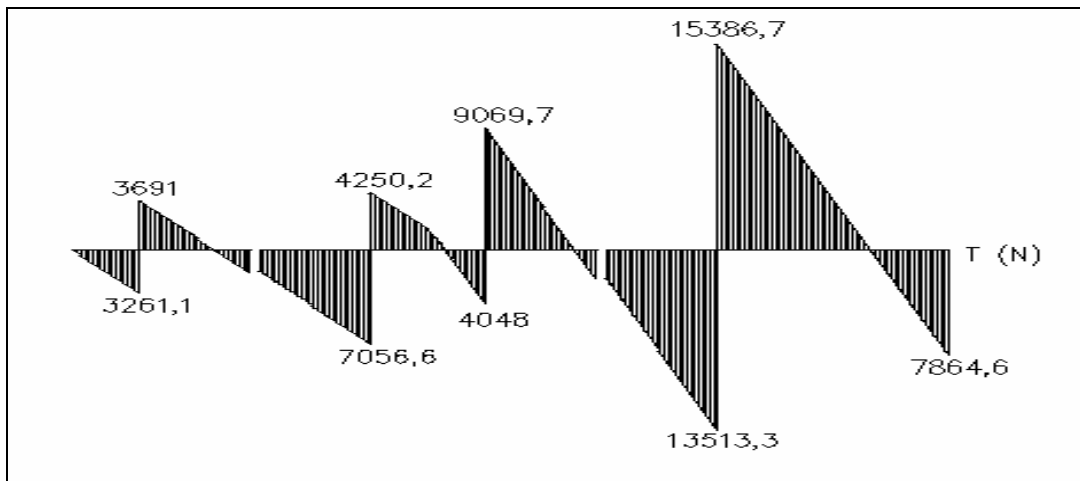


Imagen A.13 – Diagrama de fuerzas tangenciales colector general

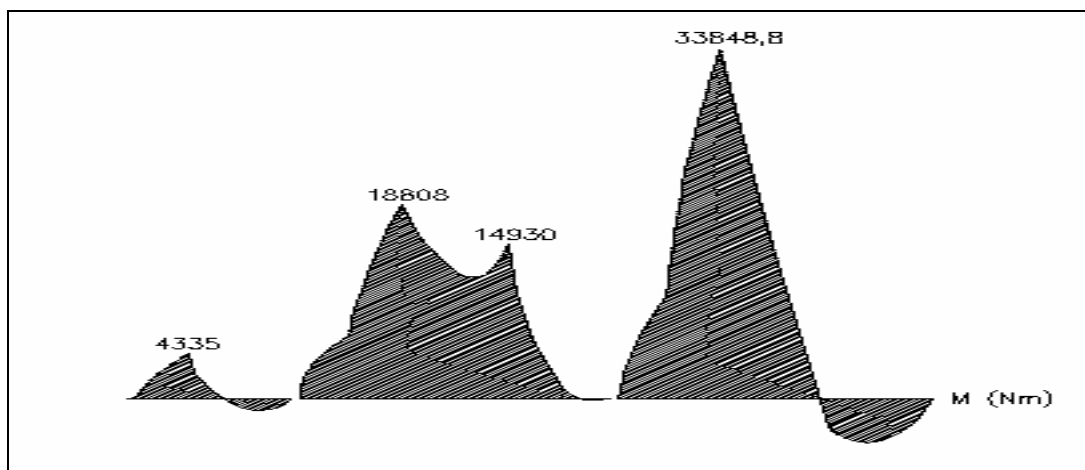


Imagen A.14 – Diagrama de momentos flectores del colector general

A partir de la imagen A.13 y A.14 y utilizando la fórmula de Von Misses se calcula la tensión de la sección crítica de cada tramo, más concretamente los puntos de tensión normal máxima ya que la tensión tangencial máxima (en los dos puntos medio del cilindro) es despreciable, suponiendo que toda la sollicitación es soportada por el acero:



$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{sc}^2 + 3 \cdot \tau_{sc}^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{sc}}{W_{sc}}\right)^2}$$

Donde:

$\sigma_{sc}$  (Pa): Tensión normal de la sección crítica donde la tensión normal es máxima

$\tau_{sc} = 0$ : Tensión tangencial de la sección crítica donde la tensión normal es máxima

$M_{sc}$  (Nm): Momento flector de la sección crítica

$W_{sc}$  (Nm): Momento resistente de la sección crítica

$$W_{sc} = \frac{\pi \cdot (D_{e13CrMo44}^4 - D_{i13CrMo44}^4)}{32 \cdot D_{e13CrMo44}}$$

$A_{sc}$  (m<sup>2</sup>): Área de la sección crítica

$$A_{sc} = \frac{\pi \cdot (D_{e13CrMo44}^2 - D_{i13CrMo44}^2)}{4}$$

Por lo tanto se tiene para cada tramo:

#### Sección crítica tramo 1

$$T_{sc1} = 3691 \text{ N}$$

$$M_{sc1} = -4335 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{T1} &= \sqrt{\sigma_{sc1}^2 + 3 \cdot \tau_{sc1}^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{sc1}}{W_{sc1}}\right)^2 + 3 \cdot 0^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{sc1}}{\frac{\pi \cdot (D_{e13CrMo44}^4 - D_{i13CrMo44}^4)}{32 \cdot D_{e13CrMo44}}}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-4335}{\frac{\pi \cdot (0,81^4 - 0,8^4)}{32 \cdot 0,81}}\right)^2} = \sqrt{1713996^2} = 1,713 \text{ MPa} \end{aligned}$$



Sección crítica tramo 2

$$T_{sc2} = -7056,6 \text{ N}$$

$$M_{sc2} = -18808 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{T2} &= \sqrt{\sigma_{sc2}^2 + 3 \cdot \tau_{sc2}^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{sc2}}{W_{sc2}}\right)^2 + 3 \cdot 0^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{M_{sc2}}{\pi \cdot (D_{e13CrMo44}^4 - D_{i13CrMo44}^4)}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{-18808}{\pi \cdot (0,81^4 - 0,8^4)}\right)^2} = \sqrt{7436410,5^2} = \\ &= 7,436 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Sección crítica tramo 3

$$T_{sc3} = 15386,7 \text{ N}$$

$$M_{sc3} = -33848,8 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{T3} &= \sqrt{\sigma_{sc3}^2 + 3 \cdot \tau_{sc3}^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{sc3}}{W_{sc3}}\right)^2 + 3 \cdot 0^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{M_{sc3}}{\pi \cdot (D_{e13CrMo44}^4 - D_{i13CrMo44}^4)}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{-33848,8}{\pi \cdot (1,314^4 - 1,3^4)}\right)^2} = \sqrt{3623360,1^2} = \\ &= 3,623 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Como en el apartado anterior para obtener un 1% de deformación después de 100000 h de trabajo a una temperatura de 470 °C se toma como límite elástico  $\sigma_e = 151,9 \text{ MPa}$ . Por lo tanto,  $\sigma_{adm} = 0,7 \cdot \sigma_e = 106,33 \text{ MPa}$ . Con esto se observa que no hay ningún problema de resistencia del material.



## A.11 Cálculo de los acoplamientos más solicitados

### A.11.1 Cálculo del acoplamiento J.E. DN1300(2) – Codo

Una de las uniones críticas para garantizar la estanqueidad del colector es la brida que une la junta de expansión J.E. DN1300(2) con el codo. Esto es debido a la fuerza de tracción que transmiten los gases a los tornillos de la unión, a su paso por el codo.

Por lo tanto para el análisis de estanqueidad del acoplamiento es necesario el cálculo de la componente horizontal de la fuerza que ejercen los gases de escape sobre el codo.

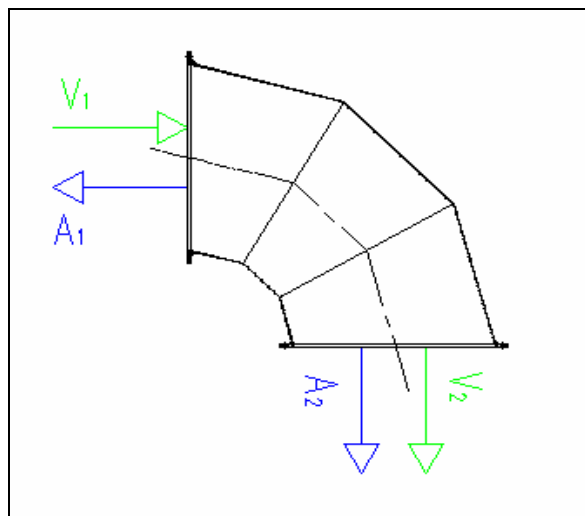


Imagen A.15 – Codo

Para realizar el cálculo de la sollicitación que se produce en la unión se utiliza mediante la ecuación de continuidad de movimiento, teniendo en cuenta que el flujo es turbulento ( $Re > 8 \cdot 10^3$ ):

$$F_{\text{codo} \rightarrow \text{fluidox}} + p_1 \cdot A_1 = -\rho \iint_{A_1} v_1 \cdot v_1 \cdot dA_1 = -\rho \cdot v_1 \cdot Q_{GE}$$

Donde:

$F_{\text{codo} \rightarrow \text{fluidox}}$  (N): Fuerza que ejerce el codo sobre los gases de escape.

$P_1$  (Pa): Presión de los gases de escape en la sección de entrada en el codo.

$A_1$  (m<sup>2</sup>): Sección de entrada del codo



$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>): Densidad de los gases de escape

$v_1$  (m/s): Velocidad de los gases de escape a la entrada del codo.

$Q_{GE}$  (m<sup>3</sup>/s): Caudal de gases de escape

Para hallar  $p_1$  se utiliza la condición de cumplimiento de la ecuación de Bernoulli entre la entrada del codo y la atmósfera:

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_a}{\gamma_a} + z_a + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} + \Delta h_{p1-a} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_1 = \left[ \frac{p_a}{\gamma_1} + (z_a - z_1) + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot (v_a^2 - v_1^2) + \Delta h_{p1-a} \right] \cdot \gamma_1$$

Donde:

$p_a = 1,01 \cdot 10^5$  Pa: Presión a la salida de la chimenea de caldera.

$\gamma_1 = \rho \cdot g = 0,51 \cdot 9,8 = 4,998$  kp/m<sup>3</sup>: Peso específico de los gases de escape.

$(z_a - z_1) = 6,89$  m: Diferencia de cotas entre la entrada del codo y la salida de chimenea de caldera.

$V_a = 17,21$  m/s

$v_1 = 23,5$  m/s

$\Delta h_{p1-a}$  (Pa): Pérdida de carga de los gases de escape desde el codo el codo hasta atmósfera:

$$\Delta h_{p1-a} = \Delta h_{s1C6} + \Delta h_{cal} + \Delta h_{C7} = 214 + 2000 + 238 = 2452 \text{ Pa}$$

Donde:

$\Delta h_{s1C6}$  (Pa): Pérdida de carga de los gases en el codo (anexo A.4).

$\Delta h_{cal}$  (Pa): Pérdida de carga de los gases en la caldera (anexo A.4).

$\Delta h_{C7}$  (Pa): Pérdida de carga de los gases desde caldera a atmósfera (anexo A.4).





$$F'_M = F'_p + F_{ps} = F'_p + F_s \cdot (1 - c)$$

Donde:

$F'_p$  (N): Fuerza remanente después del asentamiento (evita la apertura de la junta).

$F_{ps}$  (N) =  $F_s \cdot (1 - c)$ : Parte de la fuerza separadora que provoca una compresión de las piezas unidas.

$c$ : relación de rigidez (entre tornillo y piezas unidas)

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p}$$

Para el cálculo de  $k_p$  y  $k_c$  hay que tener en cuenta el número de taladros y el perímetro de la brida, así como la especificación de los pernos. Con los datos de la brida de la chimenea individual del motor, del tornillo y observando la imagen A.17 se obtiene la rigidez siguiendo el proceso indicado en *Quadern CM1. Fallada, Unions, Hertz* y en *Unions cargolades* (ver referencias [6] y [7] de la bibliografía de la memoria).

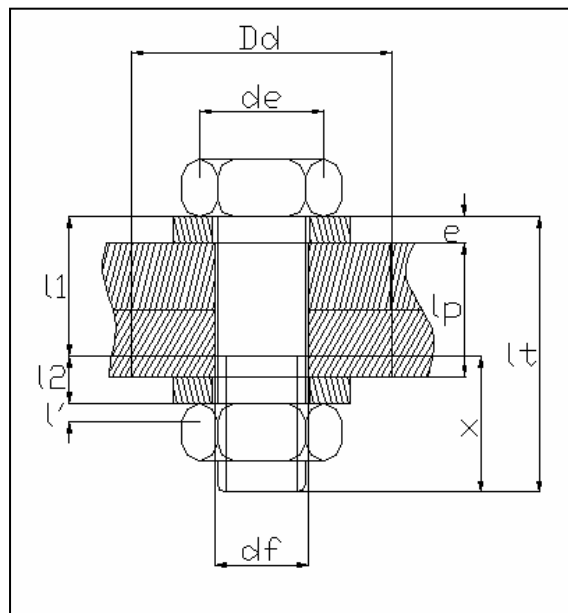


Imagen A.17 – Detalle tornillo



Para el tornillo de métrica M20 es:

$d_e$  (distancia entre caras opuestas de la cabeza del tornillo) = 30 mm

$x$  (longitud roscada) = 31 mm

$l_t$  (longitud total tornillo) = 75 mm

$l_p = 20 + 20 = 40$  mm

$l_2 = x - (l_t - 2 \cdot e - l_p) = 31 - (75 - 2 \cdot 4 - 40) = 4$  mm

$l_1 = (2 \cdot e + l_p) - l_2 = (8 + 40) - 4 = 44$  mm

$l' = 0,4 \cdot d_{\text{tornillo}} = 8$  mm

$A_T$  (área resistente) = 245 mm<sup>2</sup>

$A_1$  (área general tornillo) = 314,16 mm<sup>2</sup>

- Cálculo de la rigidez de las piezas unidas  $k_p$

Para el cálculo de  $k_p$  es necesario el cálculo de la parte de la brida que absorbe cada unión individual (tornillo). Esto es, el cálculo de  $D_d$ :

$$D_d = \frac{P_{\text{ejes}}}{n^{\circ} \text{ tornillos}} = \frac{\pi \cdot 1410}{40} = 110,7 \text{ mm}$$

Donde  $P_{\text{ejes}}$  es el perímetro de la circunferencia que contiene los ejes de los tornillos. Como  $D_d = 110,7 \text{ mm} > 3 \cdot d_e = 90 \text{ mm}$ , se calcula  $k_p$  como si se tratara de piezas extensas:

$$D_e \text{ (Diámetro equivalente)} = d_e + \frac{l_p \text{ (ancho piezas unidas)}}{10} = 30 + \frac{40}{10} = 34 \text{ mm}$$

$$A_e \text{ (Área equivalente)} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d_f^2)$$

Como la bridas son de acero bajo al carbono (módulo de Young extraído del *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de memoria)), se tiene:





$$k_p = \frac{E_p}{l_p} \cdot A_e = \frac{207 \cdot 10^3}{23} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (34^2 - 22^2) = 2731300 \frac{N}{mm}$$

- Cálculo de la rigidez del tornillo  $k_c$

Para el cálculo de  $k_c$  es necesario las partes diferenciadas del tornillo, calculadas anteriormente y detalladas en la imagen A.17. Por lo tanto, como el tornillo es de acero inoxidable ferrítico de calidad 8.8 se tiene (módulo de Young extraído de *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de memoria)):

$$k_c = \frac{E_c}{\frac{l_2 + l'}{A_T} + \frac{l'}{A_T} + \frac{l_1}{A_l}} = \frac{200 \cdot 10^3}{\frac{4 + 8}{245} + \frac{8}{245} + \frac{44}{314,16}} = 902160 \frac{N}{mm}$$

Por lo tanto la relación de rigidez queda:

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p} = \frac{902160}{902160 + 2731300} = 0,25$$

Para continuar con el cálculo de la fuerza de montaje necesaria para evitar tanto la apertura de la unión como la rotura del tornillo, se toman las estimaciones siguientes:

- 1) A falta de medidas experimentales se pueden estimar el valor del asentamiento producido ( $\delta_x$ ) como la suma de los valores de asentamiento de las piezas ( $\delta_{xj}$ ) y de la rosca ( $\delta_{xr}$ ). De esta forma se tiene:

$$\delta_{xj} = 4 \mu m \text{ (finamente mecanizado)}$$

$$\delta_{xr} = 5 \mu m$$

- 2) A falta de datos concretos, se toma la fuerza remanente como una proporción de la fuerza separadora. Esto es:

$$F_p' = 0,2 \cdot F_s$$

- 3) Se debe analizar el nivel de acción de la fuerza separadora. En este caso se



puede tomar  $i = 1$ , es decir, la  $F_s$  actúa a las superficies de contacto de la cabeza del tornillo y de la tuerca:

$$c' = i \cdot c = c$$

Por lo tanto teniendo en cuenta el asentamiento y observando el diagrama de la imagen A.16 se obtiene:

$$F_{M \min} = F'_{M \min} + \Delta F_M = F'_p + F_s \cdot (1 - c) + \Delta F_M = 0,2 \cdot F_s + F_s \cdot (1 - c) + \frac{\delta_{xj} + \delta_{xr}}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_c}} =$$

$$= 0,2 \cdot \frac{150660,2}{40} + \frac{150660,2}{40} \cdot (1 - 0,25) + \frac{4 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3}{\frac{1}{902160} + \frac{1}{2731300}} = 9681,6 \text{ N}$$

El intervalo de entre  $F_{M \min}$  y  $F_{M \max}$  es debido a la dispersión que implica el elemento de apriete utilizado. En este caso se utiliza llave neumática y por lo tanto el valor del factor de apriete  $\alpha_c$  es de 1,6 (*Unions cargolades* (ver referencia [6] de la bibliografía de la memoria)). Por lo tanto se tiene:

$$F_{M \max} = \alpha_c \cdot F_{M \min} = 1,6 \cdot 9681,6 = 15490,6 \text{ N}$$

Una vez calculada la  $F_{M \max}$  se debe comprobar que la tensión que recibe el tornillo no supera la tensión admisible del mismo. Como el tornillo queda sometido a tracción y a torsión, y tratándose de rosca normalizada es suficiente, para tener en cuenta dicha torsión, aplicar un factor de 1,35. De esta manera se tiene que:

$$\sigma = \frac{F_{M \max} + F_{cs}}{A_T} = \frac{15490,6 + 0,25 \cdot 3766,5}{245 \cdot 10^{-6}} = 28,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = 1,35 \cdot \sigma = 1,35 \cdot 28,17 = 163,43 \text{ MPa}$$

Donde:

$F_{M \max}$  (N): Fuerza de montaje máxima

$F_{cs}$  (N): Parte de la fuerza separadora que absorbe el tornillo

$A_T$  (mm<sup>2</sup>): Sección crítica del tornillo



Cogiendo un coeficiente de seguridad de 1,4 y teniendo en cuenta que los tornillos son de calidad 8.8, se calcula la tensión admisible:

$$\sigma_{adm} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 800 = 560 \text{ MPa}$$

Por lo tanto se observa que no hay problemas de rotura del tornillo ni de apertura de la unión (se ha calculado la  $F_{M \min}$  teniendo en cuenta una fuerza remanente).



### A.11.2 Cálculo del acoplamiento DIVÉRTER DN500 – Chimenea individual motor

Otro de los acoplamientos críticos es la unión entre el divérter DN500 y la chimenea individual del motor, debido a la fuerza del viento y al momento flector que ésta produce.

Como se puede observar en la imagen A.18 y A.19, la fuerza del viento provoca una fuerza de tracción en el punto 2 y otra de compresión en el punto 1, en la brida. Para el cálculo de la fuerza del viento, se utilizan los datos climatológicos detallados en el anexo A.3.1, tomando las rachas de viento máximas registradas.

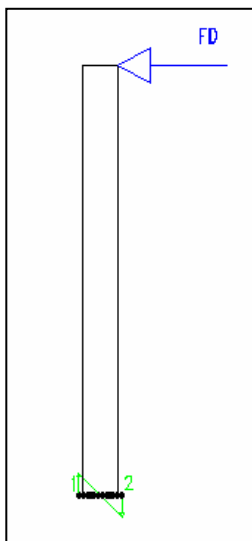


Imagen A.18 – Chimenea motor

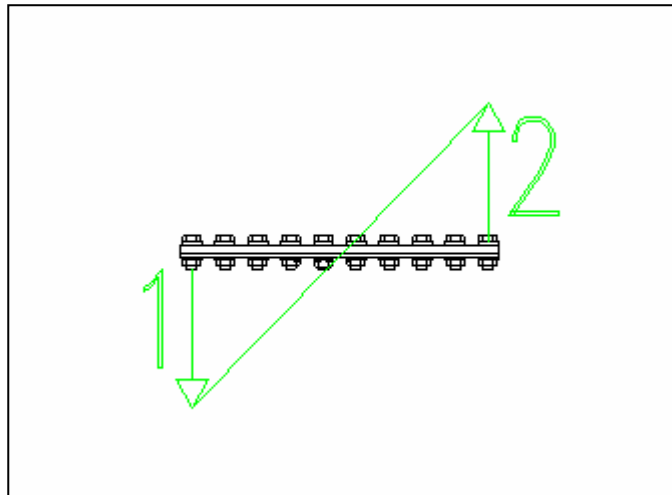


Imagen A.19 – Solicitación acop. Divérter DN500/Chimenea

Tomando la suposición de que la fuerza del viento está aplicada al punto más alto de la chimenea (peor de los casos), ésta se calcula mediante:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_D \cdot A_D = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 57^2 \cdot 0,81 \cdot 0,5 \cdot 6 = 4737 \text{ N}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ).

$C_\infty$ : Velocidad del aire extraída de las rachas máximas del anexo A.3.1 ( $57 \text{ m/s}$ )

$C_D$ : Parámetro de resistencia al avance ( $f(\text{Re})$ )



Extrayendo de *Vademecum mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (ver bibliografía de memoria), se tiene:

$$\frac{L}{d} = \frac{6}{0,5} = 12 \Rightarrow C_D = 0,81$$

$A_D$ : Área de la chimenea transversal a la dirección del fluido ( $0,5 \cdot 6 \text{ m}^2$ )

En realidad, la fuerza de reacción producida en la brida no solo se halla en los puntos 1 y 2, sino que se produce en cada posición donde se ubica un tornillo, variando, por tanto, de forma lineal y discreta. Esto se puede ver representado en la figura A.20:

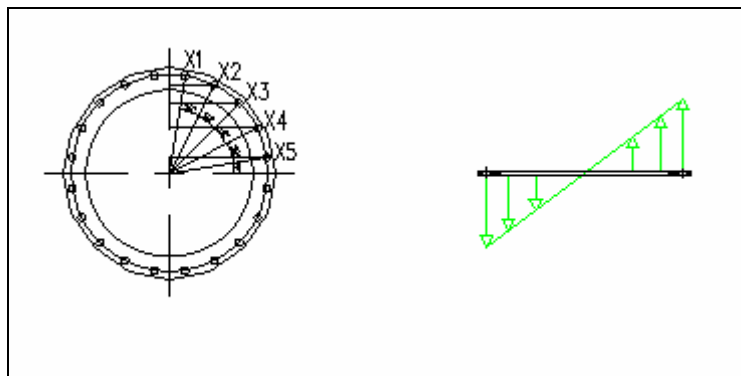


Imagen A.20 – Distribución de la fuerza separadora

En la imagen se observa que para  $x = 0$  la fuerza tiene un valor nulo, de manera que la expresión de dicha fuerza separadora debe ser de la forma  $F(x) = m \cdot x$ , donde  $x$  toma los valores donde se ubica un tornillo (función discreta). Debido a la simetría de la situación, se tiene que el momento flector producido por estas fuerzas axiales situadas en los puntos donde se halla un tornillo (del primer cuadrante) es igual a una cuarta parte del momento resistente producido por la acción del viento. Esto es:

$$\sum_{i=1}^5 (m \cdot x_i) \cdot x_i = \frac{M_A}{4} = \frac{6 \cdot F_D}{4}$$

Partiendo de las dimensiones de la brida de la chimenea y del divérter, se sabe que:

$$x_1 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(9^\circ) = 0,3 \cdot \sin(9^\circ) = 0,0469 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(9^\circ + 18^\circ) = 0,3 \cdot \sin(27^\circ) = 0,1362 \text{ m}$$



$$x_3 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(9^\circ + 2 \cdot 18^\circ) = 0,3 \cdot \sin(45^\circ) = 0,2121 \text{ m}$$

$$x_4 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(9^\circ + 3 \cdot 18^\circ) = 0,3 \cdot \sin(63^\circ) = 0,2673 \text{ m}$$

$$x_5 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(9^\circ + 4 \cdot 18^\circ) = 0,3 \cdot \sin(81^\circ) = 0,2963 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores a la expresión anterior se encuentra la pendiente de la recta que describe la evolución de la fuerza separadora:

$$\sum_{i=1}^5 (m \cdot x_i) \cdot x_i = \frac{M_A}{4} = \frac{6 \cdot F_D}{4} \Rightarrow m \cdot \sum_{i=1}^5 x_i^2 = \frac{3 \cdot 4737}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m = \frac{3 \cdot 4737}{2} \cdot \frac{1}{(0,0469^2 + 0,1362^2 + 0,2121^2 + 0,2673^2 + 0,2963^2)} = 31582,9$$

A partir de aquí se toma como punto de estudio el tornillo del punto  $x_5$ , ya que es el más solicitado. De esta forma se toma como fuerza separadora:

$$F(x_5) = m \cdot x_5 = 31582,9 \cdot 0,2963 = 9358 \text{ N}$$

A partir del diagrama de fuerza – deformación de la imagen A.16 extraído de *Unions Cargolades* (ver referencia [6] de la bibliografía de la memoria), se encuentra la expresión que da la fuerza de montaje mínima (teniendo en cuenta el asentamiento que se produce en el acoplamiento, transcurrido un tiempo después del montaje):

$$F'_M = F'_p + F_{ps} = F'_p + F_s \cdot (1 - c)$$

Donde:

$F'_p$  (N): Fuerza remanente después del asentamiento (evita la apertura de la junta).

$F_{ps}$  (N) =  $F_s \cdot (1 - c)$ : Parte de la fuerza separadora que provoca una compresión de las piezas unidas.

$c$ : Relación de rigidez (entre tornillo y piezas unidas)

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p}$$



Para el cálculo de  $k_p$  y  $k_c$  hay que tener en cuenta el número de taladros y el perímetro de la brida, así como la especificación de los pernos. Con los datos de la brida de la chimenea individual del motor, del tornillo y observando la imagen A.17 se obtiene la rigidez siguiendo el proceso indicado en *Quadern CM1. Fallada, Unions, Hertz* y en *Unions cargolades* (ver referencias [6] y [7] de la bibliografía de la memoria):

Para el tornillo de métrica M20 es:

$d_e$  (distancia entre caras opuestas de la cabeza del tornillo) = 30 mm

$x$  (longitud roscada) = 31 mm

$l_t$  (longitud total tornillo) = 55 mm

$l_p = 15+8 = 23$  mm

$l_2 = x - (l_t - 2 \cdot e - l_p) = 31 - (55 - 2 \cdot 4 - 23) = 7$  mm

$l_1 = (2 \cdot e + l_p) - l_2 = (8 + 23) - 7 = 24$  mm

$l' = 0,4 \cdot d_{\text{tornillo}} = 8$  mm

$A_T$  (área resistente) = 245 mm<sup>2</sup>

$A_1$  (área general tornillo) = 314,16 mm<sup>2</sup>

- Cálculo de la rigidez de las piezas unidas  $k_p$

Para el cálculo de  $k_p$  es necesario el cálculo de la parte de la brida que absorbe cada unión individual (tornillo). Esto es, el cálculo de  $D_d$ :

$$D_d = \frac{P_{\text{ejes}}}{n^{\circ} \text{ tornillos}} = \frac{\pi \cdot 600}{20} = 94,2 \text{ mm}$$

Donde  $P_{\text{ejes}}$  es el perímetro de la circunferencia que contiene los ejes de los tornillos. Como  $D_d = 94,2 \text{ mm} > 3 \cdot d_e = 90 \text{ mm}$ , se calcula  $k_p$  como si se tratara de piezas extensas:



$$D_e \text{ (Diámetro equivalente)} = d_e + \frac{l_p \text{ (ancho piezas unidas)}}{10} = 30 + \frac{23}{10} = 32,3 \text{ mm}$$

$$A_e \text{ (Área equivalente)} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d_f^2)$$

Como la bridas son de acero bajo al carbono (módulo de Young extraído del *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de memoria)), se tiene:

$$k_p = \frac{E_p}{l_p} \cdot A_e = \frac{207 \cdot 10^3}{23} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (32,3^2 - 22^2) = 3953388 \frac{N}{mm}$$

- Cálculo de la rigidez del tornillo  $k_c$

Para el cálculo de  $k_c$  es necesario las partes diferenciadas del tornillo, calculadas anteriormente y detalladas en la imagen A.17. Por lo tanto, como el tornillo es de acero inoxidable ferrítico de calidad 8.8 se tiene (módulo de Young extraído de *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de memoria)):

$$k_c = \frac{E_c}{\frac{l_2 + l'}{A_T} + \frac{l'}{A_T} + \frac{l_1}{A_1}} = \frac{200 \cdot 10^3}{\frac{7+8}{245} + \frac{8}{245} + \frac{24}{314,16}} = 1174593 \frac{N}{mm}$$

Por lo tanto la relación de rigidez queda:

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p} = \frac{1174593}{1174593 + 3953388} = 0,24$$

Para continuar con el cálculo de la fuerza de montaje necesaria para evitar tanto la apertura de la unión como la rotura del tornillo, se toman las estimaciones 1), 2) y 3) del anexo A.11.1.

Por lo tanto teniendo en cuenta el asentamiento y observando el diagrama de la imagen A.16 se obtiene:

$$F_{M \min} = F'_{M \min} + \Delta F_M = F'_p + F_s \cdot (1 - c) + \Delta F_M = 0,2 \cdot F_s + F_s \cdot (1 - c) + \frac{\delta_{xj}}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_c}} =$$





$$= 0,2 \cdot 9358 + 9358 \cdot (1 - 0,24) + \frac{4 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{3953388} + \frac{1}{11744593}} = 17133,6 \text{ N}$$

El intervalo de entre  $F_{M \min}$  y  $F_{M \max}$  es debido a la dispersión que implica el elemento de apriete utilizado. En este caso se utiliza llave neumática y por lo tanto el valor del factor de apriete  $\alpha_c$  es de 1,6 (*Unions cargolades* (ver referencia [6] de la bibliografía de la memoria)). Por lo tanto se tiene:

$$F_{M \max} = \alpha_c \cdot F_{M \min} = 1,6 \cdot 17133,6 = 27413,8 \text{ N}$$

Una vez calculada la  $F_{M \max}$  se debe comprobar que la tensión que recibe el tornillo no supera la tensión admisible del mismo. Como el tornillo queda sometido a tracción y a torsión, y tratándose de rosca normalizada es suficiente, para tener en cuenta dicha torsión, aplicar un factor de 1,35. De esta manera se tiene que:

$$\sigma = \frac{F_{M \max} + F_{cs}}{A_T} = \frac{27413,8 + 0,24 \cdot 9358}{245 \cdot 10^{-6}} = 121,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = 1,35 \cdot \sigma = 1,35 \cdot 121,06 = 163,43 \text{ MPa}$$

Donde:

$F_{M \max}$  (N): Fuerza de montaje máxima

$F_{cs}$  (N): Parte de la fuerza separadora que absorbe el tornillo

$A_T$  (mm<sup>2</sup>): Sección crítica del tornillo

Cogiendo un coeficiente de seguridad de 1,4 y teniendo en cuenta que los tornillos son de calidad 8.8, se calcula la tensión admisible:

$$\sigma_{adm} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 800 = 560 \text{ MPa}$$

Por lo tanto se observa que no hay problemas de rotura del tornillo ni de apertura de la unión (se ha calculado la  $F_{M \min}$  teniendo en cuenta una fuerza remanente).



### A.11.3 Cálculo del acoplamiento entre la CONEXIÓN ECONOMIZADOR/CHIMENEA – Chimenea Caldera

Otro punto conflictivo debido a la fuerza del viento es el acoplamiento entre la conexión ECONOMIZADOR/CHIMENEA – CHIMENEA CALDERA.

Como en el caso del anexo A.11.2 y observando en la imagen A.21 y A.22, la fuerza del viento provoca una fuerza de tracción en el punto 2 y una fuerza de compresión en el punto 1, en la brida. Para el cálculo de la fuerza del viento, se utilizan los datos climatológicos detallados en el anexo A.3.1, tomando las rachas de viento máximas registradas.

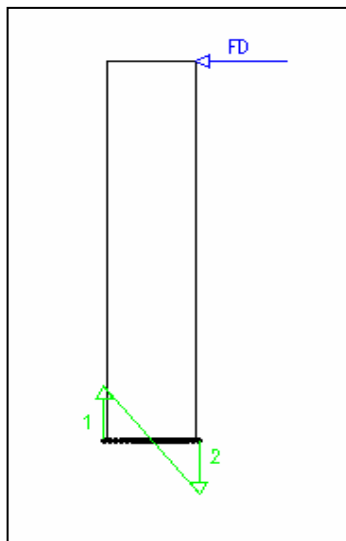


Imagen A.21 – Chimenea Caldera

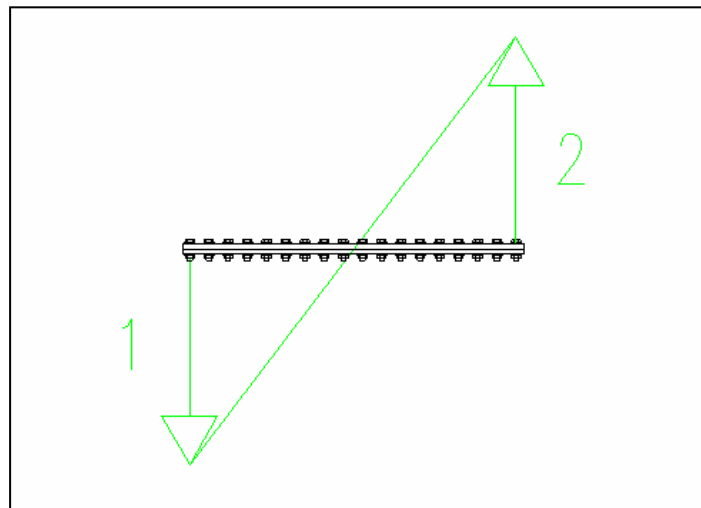


Imagen A.22 – Solicitación acopl. Conex. Chimenea Caldera

Tomando la suposición de que la fuerza del viento está aplicada al punto más alto de la chimenea (peor de los casos), ésta se calcula mediante:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_D \cdot A_D = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 57^2 \cdot 0,72 \cdot 1,2 \cdot 5 = 8421,4 \text{ N}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ).

$C_\infty$ : Velocidad del aire extraída de las rachas máximas del anexo A.3.1 (57 m/s)

$C_D$ : Parámetro de resistencia al avance ( $f(Re)$ )



Extrayendo de *Vademecum mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (ver bibliografía de memoria), se tiene:

$$\frac{L}{d} = \frac{5}{1,2} = 4,17 \Rightarrow C_D = 0,72$$

$A_D$ : Área de la chimenea transversal a la dirección del fluido y en contacto con el aire ( $0,5 \cdot 6 \text{ m}^2$ ).

Como en el caso del anexo A.11.2, la fuerza de reacción producida en la brida no solo se halla en los puntos 1 y 2, sino que se produce en cada posición donde se ubica un tornillo, variando, por tanto, de forma lineal y discreta. Esto se puede ver representado en la figura A.23:

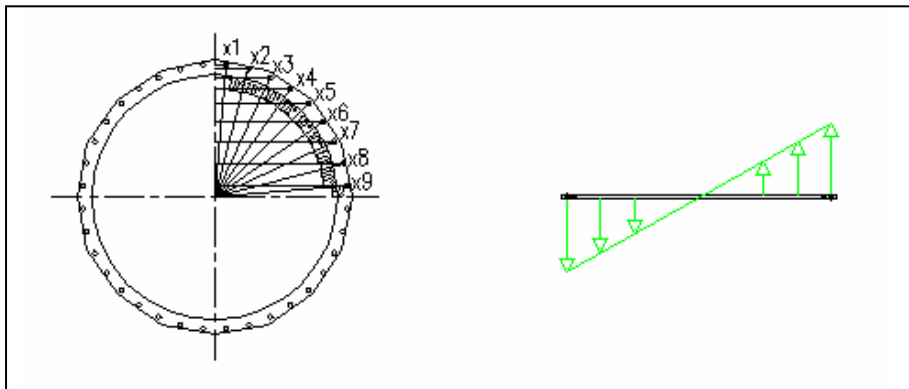


Imagen A.23 – Distribución de la fuerza separadora

Debido a la simetría de la situación, se tiene que el momento flector producido por estas fuerzas axiales situadas en los puntos donde se halla un tornillo (del primer cuadrante) es igual a una cuarta parte del momento resistente producido por la acción del viento. Esto es:

$$\sum_{i=1}^9 (m \cdot x_i) \cdot x_i = \frac{M_A}{4} = \frac{6 \cdot F_D}{4}$$

Partiendo de las dimensiones de la brida de la chimenea, se sabe que:

$$x_1 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ) = 0,655 \cdot \sin(9^\circ) = 0,072 \text{ m}$$



$$x_2 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(27^\circ) = 0,169 \text{ m}$$

$$x_3 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 2 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(25^\circ) = 0,2115 \text{ m}$$

$$x_4 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 3 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(35^\circ) = 0,375 \text{ m}$$

$$x_5 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 4 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(45^\circ) = 0,463 \text{ m}$$

$$x_6 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 5 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(55^\circ) = 0,536 \text{ m}$$

$$x_7 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 6 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(65^\circ) = 0,593 \text{ m}$$

$$x_8 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 7 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(75^\circ) = 0,632 \text{ m}$$

$$x_9 = \frac{d_3}{2} \cdot \sin(5^\circ + 8 \cdot 10^\circ) = 0,655 \cdot \sin(85^\circ) = 0,652 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores a la expresión anterior se encuentra la pendiente de la recta que describe la evolución de la fuerza separadora:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^9 (m \cdot x_i) \cdot x_i &= \frac{M_A}{4} = \frac{6 \cdot F_D}{4} \Rightarrow m \cdot \sum_{i=1}^9 x_i^2 = \frac{3 \cdot 8421,4}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow m &= \frac{12632,1}{(0,072^2 + 0,169^2 + 0,2115^2 + 0,375^2 + 0,463^2 + 0,536^2 + 0,593^2 + 0,632^2 + 0,652^2)} = \\ &= 6648,5 \end{aligned}$$

A partir de aquí se toma como punto de estudio el tornillo del punto  $x_9$ , ya que es el más solicitado. De esta forma se toma como fuerza separadora:

$$F(x_9) = m \cdot x_9 = 6648,5 \cdot 0,652 = 4334,8 \text{ N}$$

A partir del diagrama de fuerza – deformación de la imagen A.16 extraído de *Unions Cargolades* (ver referencia [6] de la bibliografía de la memoria), se encuentra la expresión que da la fuerza de montaje mínima (teniendo en cuenta el asentamiento que se produce en el acoplamiento, transcurrido un tiempo después del montaje).

$$F'_M = F'_p + F_{ps} = F'_p + F_s \cdot (1 - c)$$

Donde:



$F_p'$  (N): Fuerza remanente después del asentamiento (evita la apertura de la junta).

$F_{ps}$  (N) =  $F_S \cdot (1-c)$ : Parte de la fuerza separadora que provoca una compresión de las piezas unidas.

c: Relación de rigidez (entre tornillo y piezas unidas)

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p}$$

Con los datos de la brida de la chimenea individual del motor, del tornillo y observando la imagen A.17 se obtiene la rigidez siguiendo el proceso indicado en *Quadern CM1. Fallada, Unions, Hertz* y en *Unions cargolades* (ver referencias [6] y [7] de la bibliografía de la memoria).

Para el tornillo de métrica M20 de la brida de la chimenea de la caldera es:

$d_e$  (distancia entre caras opuestas de la cabeza del tornillo) = 30 mm

$x$  (longitud roscada) = 31 mm

$l_t$  (longitud total tornillo) = 75 mm

$l_p = 20 + 20 = 40$  mm

$l_2 = x - (l_t - 2 \cdot e - l_p) = 31 - (75 - 2 \cdot 4 - 40) = 4$  mm

$l_1 = (2 \cdot e + l_p) - l_2 = (8 + 40) - 4 = 44$  mm

$l' = 0,4 \cdot d_{\text{tornillo}} = 8$  mm

$A_T$  (área resistente) = 245 mm<sup>2</sup>

$A_1$  (área general tornillo) = 314,16 mm<sup>2</sup>

- Cálculo de la rigidez de las piezas unidas  $k_p$

Para el cálculo de  $k_p$  es necesario el cálculo de la parte de la brida que absorbe cada unión individual (tornillo). Esto es, el cálculo de  $D_d$ :



$$D_d = \frac{P_{\text{ejes}}}{n^{\circ} \text{ tornillos}} = \frac{\pi \cdot 1310}{36} = 114,32 \text{ mm}$$

Donde  $P_{\text{ejes}}$  es el perímetro de la circunferencia que contiene los ejes de los tornillos. Como  $D_d = 114,32 \text{ mm} > 3 \cdot d_e = 90 \text{ mm}$ , se calcula  $k_p$  como si se tratara de piezas extensas:

$$D_e \text{ (Diámetro equivalente)} = d_e + \frac{l_p \text{ (ancho piezas unidas)}}{10} = 30 + \frac{40}{10} = 34 \text{ mm}$$

$$A_e \text{ (Área equivalente)} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d_f^2)$$

Como la bridas son de acero bajo al carbono (módulo de Young extraído del *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de la memoria)), se tiene:

$$k_p = \frac{E_p}{l_p} \cdot A_e = \frac{207 \cdot 10^3}{40} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (34^2 - 22^2) = 2731300 \frac{N}{mm}$$

- Cálculo de la rigidez del tornillo  $k_c$

Para el cálculo de  $k_c$  es necesario las partes diferenciadas del tornillo, calculadas anteriormente y detalladas en la imagen A.17. Por lo tanto, como el tornillo es de acero inoxidable ferrítico de calidad 8.8 se tiene (módulo de Young extraído de *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (ver bibliografía de la memoria)):

$$k_c = \frac{E_c}{\frac{l_2 + l'}{A_T} + \frac{l'}{A_T} + \frac{l_1}{A_1}} = \frac{200 \cdot 10^3}{\frac{4 + 8}{245} + \frac{8}{245} + \frac{44}{314,16}} = 902166 \frac{N}{mm}$$

Por lo tanto la relación de rigidez queda:

$$c = \frac{k_c}{k_c + k_p} = \frac{902166}{902166 + 2731300} = 0,25$$

Para continuar con el cálculo de la fuerza de montaje necesaria para evitar tanto la apertura de la unión como la rotura del tornillo, se toman las estimaciones 1), 2) y 3) del anexo A.11.1.



Por lo tanto teniendo en cuenta el asentamiento y observando el diagrama de la imagen A.16 se obtiene:

$$F_{M \min} = F_{M \min}' + \Delta F_M = F_p' + F_s \cdot (1 - c) + \Delta F_M = 0,2 \cdot F_s + F_s \cdot (1 - c) + \frac{\delta_{xj} + \delta_{xr}}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_c}} =$$

$$= 0,2 \cdot 4334,8 + 4334,8 \cdot (1 - 0,25) + \frac{4 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3}{\frac{1}{2731300} + \frac{1}{902166}} = 11305,2 \text{ N}$$

Utilizando también llave neumática como elemento de apriete se tiene un factor de apriete de 1,6. Por lo tanto se tiene:

$$F_{M \max} = \alpha_c \cdot F_{M \min} = 1,6 \cdot 18088,2 \text{ N}$$

Una vez calculada la  $F_{M \max}$  se debe comprobar que la tensión que recibe el tornillo no supera la tensión admisible del mismo. Como el tornillo queda sometido a tracción y a torsión, y tratándose de rosca normalizada es suficiente, para tener en cuenta dicha torsión, aplicar un factor de 1,35. De esta manera se tiene que:

$$\sigma = \frac{F_{M \max} + F_{cs}}{A_T} = \frac{18088,2 + 0,25 \cdot 4334,8}{245 \cdot 10^{-6}} = 78,25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = 1,35 \cdot \sigma = 1,35 \cdot 78,25 = 105,6 \text{ MPa}$$

Donde:

$F_{M \max}$  (N): Fuerza de montaje máxima

$F_{cs}$  (N): Parte de la fuerza separadora que absorbe el tornillo

$A_T$  (mm<sup>2</sup>): Sección crítica del tornillo

Cogiendo un coeficiente de seguridad de 1,4 y teniendo en cuenta que los tornillos son de calidad 8.8, se calcula la tensión admisible:

$$\sigma_{adm} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 800 = 560 \text{ MPa}$$

Por lo tanto se observa que no hay problemas de rotura del tornillo ni de apertura de la unión (se ha calculado la  $F_{M \min}$  teniendo en cuenta una fuerza remanente).



## ANEXO B. NORMAS Y REGLAMENTACIÓN

En el presente anexo se citan las diferentes normas utilizadas y la reglamentación que afecta al objeto del proyecto y su montaje:

- *Manual de Cálculo de Altura de chimeneas industriales*, correspondiente a la división de información, documentación y publicaciones del Ministerio de Industria, Turismo y Trabajo.
- *Real Decreto 1073/2002*, por el que se modifican el D833/75, el RD 1613/1985 y el RD 717/1987, y por el cual se establecen nuevas Normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por NO<sub>x</sub> y plomo.
- *Norma DIN 17155*, referente materiales de chapas y tubos de acero al carbono para trabajar a temperatura de hasta 500 °C.
- *Norma DIN 2413*, referente al cálculo del espesor de tubos para trabajar a alta temperatura.
- *Real Decreto 39/1997*, por el que se aprueba el *Reglamento de los Servicios de Prevención* en el que se incluyen las Guías Técnicas elaboradas por el INSHT, y entre las que destaca la *Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los equipos de trabajo*.
- *Real Decreto 16271/1997*, por el que se aprueban las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- *Real Decreto 485/1997*, por el que se especifican las disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- *Real Decreto 1215/1997*, por el que se establecen las disposiciones mínimas de





seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

- *Ley num. 13 de Julio de 1987* de la “Generalitat de Catalunya” sobre seguridad de las instalaciones industriales.
- *Orden 6 Octubre de 1980*, por la que se aprueba la instrucción técnica complementaria MIA-AP2 del *Reglamento de aparatos a presión sobre Tuberías para fluidos relativos a calderas* publicado en el *BOE 265 – 4/11/1980*.
- *Norma UNE 10010319114*, referente a los soportes para conductos de chapa metálica.
- *Norma API 1104*, referente a la especificación por soldadura y homologación de procedimientos.
- *Real Decreto 2818/1998*, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración.
- Ordenanzas municipales vigentes.



## ANEXO C.ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS

En el anexo C se especifican los principales datos técnicos y dimensiones de los equipos que están relacionados directamente con el colector de los gases de escape.

### C.1 Especificación de los Motores de cogeneración

MOTOGENERADOR		
UNIDADES	6 motores + 6 alternadores	
SERVICIO	Combustión Gas de Síntesis	
PRODUCTO	Gas de Síntesis/aire	
DATOS TÉCNICOS		
Estado producto entrada	Gas	
Tipo motogenerador	GAS OTTO	
Rendimiento eléctrico	38%	
Disposición de equipos	Interior edificio	
Temperatura	50	°C
Caudal de Gas	17403	kg/h
PCI	29,57	J/kg
Presión de operación	0,5	bar
Horas de funcionamiento	8000	h/año
Temp. Max. Ambiente	40	°C
Temp. Salida Gases	463	°C
Potencia eléctrica	1575	kW



Tensión	6300	V
Emisiones Nox	< 500	mg/m <sup>3</sup> (C.N.)
Altura resp. Nivel del mar	43	m
Potencia circuito refrigeración de alta	691	kW
Potencia circuito refrigeración de baja	176	kW
Peso	24000	kg
Otros	Uno de ellos funcionará alternativamente con Gas Natural y con GS	
DIMENSIONES		
Altura	3600	mm
Longitud	7950	mm
Anchura	1900	mm

Tabla C.1- Especificación motogenerador



## C.2 Especificación de la Caldera de vapor

CALDERA DE VAPOR		
UNIDADES	1	
SERVICIO	Generación de vapor	
PRODUCTO	Gas de Escape/vapor	
DATOS TÉCNICOS		
Estado producto entrada	Gas/vapor	
Disposición de equipos	Interior edificio	
Temp. Entrada Gases	463	°C
Temp. Salida Gases	160	°C
Caudal de Gas de Escape	58948	kg/h
Velocidad de entrada	20 - 25	m/s
Caudal de Vapor	6900	kg/h
Presión de vapor	7	bar
Calidad del Vapor	Saturado seco	
Horas de funcionamiento	8000	h/año
Temp. Entrada Agua	40	°C
Temp. Salida Vapor	165	°C
Pérdida de carga gases	150	mm.c.a.
Peso vacío/servicio	40000/65000	kg
Altura resp. Nivel del mar	43	m



Temperatura entrada circuito refrigeración	30	°C
Temperatura salida circuito refrigeración	34	°C
Otros	Agua de alimentación descalcificada y desgasificada	
DIMENSIONES		
Altura	4000	mm
Longitud	9240	mm
Anchura ( $\phi$ )	1900	mm
Brida entrada/salida ( $\phi$ )	1300/1300	mm

Tabla C.2 – Especificación de la Caldera de vapor



### C.3 Especificación del Economizador

<b>ECONOMIZADOR</b>		
UNIDADES	1	
SERVICIO	Aumento temp. Agua de caldera	
PRODUCTO	Gas de Escape / Agua	
DATOS TÉCNICOS		
Estado producto entrada	Gas / líquido	
Disposición de equipos	Interior edificio	
Temp. Entrada Gases	200	°C
Temp. Salida Gases	160	°C
Caudal de Gas de Escape	58948	kg/h
Caudal de Agua	7321	kg/h
Presión de trabajo	12	bar
Horas de funcionamiento	8000	h/año
Temp. Entrada Agua	45	°C
Temp. Salida Agua	168	°C
Pérdida de carga gases	20	mm.c.a.
Pérdida de carga agua	550	mm.c.a.
Altura resp. Nivel del mar	43	m
Peso vacío	8700	kg



Temperatura salida circuito refrigeración	34	°C
DIMENSIONES		
Altura	1500	mm
Longitud	2514	mm
Anchura ( $\phi$ )	1614	mm
Bridas	1600 x 2500	mm

Tabla C.3 – Especificación del Economizador



## **ANEXO D.CÁLCULO ESTUDIO ECONÓMICO**

Para el análisis económico del presente proyecto es necesario tener en cuenta del conjunto diferenciado al que pertenece, esto es el ciclo de cola.

Partiendo de ofertas preliminares de los diferentes equipos que forman parte del ciclo de cola, se detalla el presupuesto, que servirá de base para el estudio de viabilidad económica.





## D.1 Presupuesto del ciclo de cola

En la tabla D.1 se detallan las diferentes partidas del ciclo de cola, prestando más atención a los equipos o accesorios que forman parte o interactúan con el colector de gases de escape.

<b>PRESUPUESTO</b>	
<b>GENERADOR DE VAPOR</b>	<b>330.400 €</b>
Caldera Piro-tubular mixta	143.900 €
Economizador	23.850 €
Quemador convencional de GN	39.150 €
Cuadro control. Alarmas	72.000 €
Cuadro control. Quemador y CCM	
Sistema de motobombas	
Instrumentación	
Cableado eléctrico	
Aislamiento y acabados	
Sistema de muestreo	
Transporte, montaje y puesta en marcha	51.500 €
<b>DESGASIFICADOR</b>	<b>69.400 €</b>
Desgasificador térmico inox. 304/14306	16.500 €
Tanque almacenamiento agua desg. 10 m <sup>3</sup>	11.750 €
Tuberías	30.050 €
Valvulería	



Ampliación cuadro control. Alarmas	
Instrumentación	
Cableado eléctrico	
Plataforma y escalera	
Aislamiento y acabados	
Transporte, montaje y puesta en marcha	11.100 €
<b>TURBOGENERADOR</b>	<b>977.000 €</b>
Turbina	924.000 €
Alternador	
Tuberías	
Condensador	
Instrumentación y control	
Transporte, montaje y puesta en marcha	53.000 €
<b>COLECTOR DE GASES</b>	<b>128.140 €</b>
Diverter DN500 (6)	22.500 €
Diverter DN1300 (1)	12.600 €
Junta Expansión DN500 (18)	18.000 €
Junta Expansión DN800 (1)	1.600 €
Junta Expansión DN1300 (6)	14.640 €
Chimenea caldera (1)	5.600 €
Chimenea motores (6)	10.200 €
Silenciador (6)	4.800 €
Conductos gases de escape	38.200 €
Tramos colector	



Soportes	
Codo	
Conexiones economizador	
Transporte, montaje y puesta en marcha	Incluidos en la partida del Tubogenerador
<b>INGENIERÍA 8%</b>	<b>120.395 €</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.625.335 €</b>

Tabla D.1 – Presupuesto del ciclo de cola



## D.2 Estudio económico del ciclo de cola

Para el estudio de viabilidad económica de la instalación del ciclo de cola en la planta es necesario saber los ingresos que se obtienen por Watt vendido a la red eléctrica. Para ello, se detallan diferentes grupos de instalaciones con subvenciones específicas para cada grupo en el Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre de 1998, publicado por el Ministerio de Industria Turismo y Comercio.

Para las características del residuo tratado en la planta (detallado a lo largo de la memoria) para la generación de energía eléctrica, ésta se ubica dentro del grupo c.2. Para las instalaciones pertenecientes a este grupo tienen una prima por la energía eléctrica exportada que sigue la expresión:

$$Prima = d + (c - d) \cdot \frac{(50 - P)}{40} = 6 + (22,2 - 6) \cdot \frac{(50 - 10,88)}{40} = 21,8 \frac{\text{euros}}{\text{MWh}}$$

Donde:

$c = 22,2 \text{ €/MWh}$ : Prima correspondiente a las instalaciones de  $P < 10 \text{ MW}$

$d = 6 \text{ €/MWh}$ : Prima correspondiente a las instalaciones de  $P > 50 \text{ MW}$

$P = 10,88 \text{ MW}$ : Potencia generada por la planta.

Por otra parte, consultando el informe anual del 2004 de la REE (Red Eléctrica de España), se toma como precio final en el mercado de producción  $p_G = 35,7 \text{ €/MWh}$ .

Por lo tanto el precio que adquiere la energía exportada es:

$$p = p_G + Prima = 35,7 + 21,8 = 57,5 \text{ €/MWh}$$

A partir de las características de funcionamiento de la planta se obtiene el ingreso anual debido a la energía exportada por parte del ciclo de cola (no del resto de la planta):

$$\text{Ingreso} = (P_{\text{gen}} - P_{\text{aut}}) \cdot H \cdot p = (1,43 - 0,42) \cdot 8000 \cdot 57,5 = 464600 \text{ €/MWh}$$

Donde:

$P_{\text{gen}} = 1,43 \text{ MW}$ : Potencia generada por la turbina



$P_{\text{aut}} = 0,42 \text{ MW}$ : Potencia consumida por la turbina

$H = 8000 \text{ h}$ : N° de horas de funcionamiento anual de la planta

$p = 57,5 \text{ €/MWh}$ : Precio de la energía exportada a la red eléctrica

Aunque la vida de la planta ha sido estimada para 20 años, el estudio de inversión se realizará a 10 años vista, consiguiendo así un cálculo más conservador. Esto supone que amortización del immobilizado será en 10 años:

Amort. immobilizado = (Presupuesto Total – Ingeniería – Transporte – Montaje) · 1/10 = =  
(1625335 – 120395 – (51500 + 11100 + 53000)) = 138935 €/año

Por otra banda, los principales costes generados debido a la actividad del ciclo de cola son:

- Salario personal de planta (dedicado al ciclo de cola): 148998 €/año.
- Seguro de explotación: 17930 €/año.
- Mantenimiento ciclo de cola: 91563 €/año.

Con las inflaciones de los últimos 3 años se calcula la inflación media del IPC en Cataluña, y se toma ésta en referencia a los 10 próximos años:

Año	IPC Cataluña
2004	3,60%
2003	3,10%
2002	4,30%

Tabla D.2 – IPC Cataluña últimos 3 años

Con lo que se tiene:

$$IPC_{\text{estimada}} = \frac{3,60 + 3,10 + 4,30}{3} = 3,67 \%$$

Aplicando este incremento anual en los ingresos y los gastos, se obtiene la tabla D.3



	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
INVERSIÓN	510.000 €	1.190.000 €									
INGRESOS		464.600 €	481.651 €	499.327 €	517.653 €	536.651 €	556.346 €	576.764 €	597.931 €	619.875 €	642.624 €
Amortizaciones inmovilizado		-138.935 €	-138.934 €	-138.933 €	-138.932 €	-138.931 €	-138.930 €	-138.929 €	-138.928 €	-138.927 €	-138.926 €
Personal planta dedicado Ciclo Cola		-120.998 €	-125.439 €	-130.042 €	-134.815 €	-139.762 €	-144.892 €	-150.209 €	-155.722 €	-161.437 €	-167.362 €
Mantenimiento Ciclo Cola		-91.563 €	-94.923 €	-98.407 €	-102.019 €	-105.763 €	-109.644 €	-113.668 €	-117.840 €	-122.164 €	-126.648 €
Seguro Explotación		-17.930 €	-18.588 €	-19.270 €	-19.977 €	-20.711 €	-21.471 €	-22.259 €	-23.076 €	-23.922 €	-24.800 €
BaII	0	95.174 €	103.767 €	112.675 €	121.910 €	131.484 €	141.409 €	151.698 €	162.366 €	173.424 €	184.888 €
Impuesto de sociedades (35%)	0	-33.311 €	-36.318 €	-39.436 €	-42.668 €	-46.019 €	-49.493 €	-53.094 €	-56.828 €	-60.698 €	-64.711 €
BdI	0	61.863 €	67.448 €	73.239 €	79.241 €	85.464 €	91.916 €	98.604 €	105.538 €	112.726 €	120.177 €
Amortizaciones inmovilizado		138.935 €	138.934 €	138.933 €	138.932 €	138.931 €	138.930 €	138.929 €	138.928 €	138.927 €	138.926 €
<b>FONDOS GENERADOS</b>	0	200.798 €	206.382 €	212.172 €	218.173 €	224.395 €	230.846 €	237.533 €	244.466 €	251.653 €	259.103 €
<b>FONDOS INVERTIDOS</b>	510.000 €	1.190.000 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
<b>FLUJOS DE CAJA</b>	-510.000 €	-989.202 €	206.382 €	212.172 €	218.173 €	224.395 €	230.846 €	237.533 €	244.466 €	251.653 €	259.103 €
<b>Σ FLUJOS DE CAJA</b>	-510.000 €	-1.499.202 €	-1.292.819 €	-1.080.648 €	-862.474 €	-638.079 €	-407.233 €	-169.700 €	74.766 €	326.418 €	585.522 €

Tabla D.3 – Tabla de Flujos de caja

Donde:

BaII (Beneficio antes de Impuestos) = INGRESOS – (Amort. Inmovilizado + Personal planta dedicado Ciclo Cola + Seguro Explotación).

BdI (Beneficio después de Impuestos) = BaII – Impuesto de sociedades =  
= BaII · (1 - 0,35)

FONDOS GENERADOS = BdI + Amortizaciones Inmovilizado

$Q_t$  (FLUJO CAJA año t) = FONDOS INVERTIDOS – FONDOS GENERADOS

Observando los resultados, en primer lugar se tiene que el PAY-BACK o periodo de retorno es 8 años. Esto es el número de años necesarios para recuperar totalmente la inversión inicial.

Como se puede observar en la tabla D.3, se ha supuesto una financiación de la inversión de 30 % procedente de fondos propios en el año 0 y de 70 % procedente de un préstamo bancario en el año 1.

Para la evaluación de la viabilidad del proyecto se debe calcular el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

Para el cálculo del VAN se sigue la expresión:

$$VAN_k [\text{euros}] = \sum_{t=0}^{10} \frac{Q_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

k: Coste de capital (en tanto por uno). Su cálculo viene dado por la fórmula:

$$k = 0,7 \cdot (i - 0,35) + 0,3 \cdot C_{op}$$

Donde:

i (en tanto por uno): Interés del préstamo bancario

$C_{op}$ : Coste de oportunidad de los fondos propios (viene a indicar la rentabilidad pérdida al no invertir esos fondos propios en otra alternativa de inversión)



mejor).

Una de las posibilidades para su cálculo es tomar como referencia las Obligaciones del Estado a 10 años y sumarle una prima de riesgo. Por lo tanto, a partir de la publicación en Noviembre (Tesoro Público) de las Obligaciones del Estado a 10 años, se tiene:

$$k = 0,7 \cdot (i - 0,35) + 0,3 \cdot (3,15 + 1) = 0,7 \cdot (i - 0,35) + 1,24$$

Como el coste de capital no se puede conocer con certeza, se calcula el VAN para un rango de k que depende del interés del préstamo bancario:

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,5 \\ 3,7 \\ 3,9 \\ 4,1 \\ 4,3 \\ 4,5 \\ 4,7 \\ 4,9 \\ 5,1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \\ k_7 \\ k_8 \\ k_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,44 \\ 3,58 \\ 3,72 \\ 3,86 \\ 4,00 \\ 4,14 \\ 4,28 \\ 4,42 \\ 4,56 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} VAN_{3,44} \\ VAN_{3,58} \\ VAN_{3,72} \\ VAN_{3,86} \\ VAN_{4,00} \\ VAN_{4,14} \\ VAN_{4,28} \\ VAN_{4,42} \\ VAN_{4,56} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 231111 \\ 218777 \\ 206587 \\ 194539 \\ 182632 \\ 170864 \\ 159233 \\ 147737 \\ 136374 \end{pmatrix}$$

El TIR, al ser la tasa de actualización que hace que el VAN sea cero, se calcula imponiendo:

$$VAN = 0 \Rightarrow \sum_{t=0}^{10} \frac{Q_t}{(1+r)^t} = 0 \Rightarrow r = 0,0638 \Rightarrow TIR = 6,38 \%$$





## **ANEXO E. PLANING DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL CICLO DE COLA**

En este anexo se adjuntan por un lado el programa de tareas de la construcción de las diferentes partes que constituyen el ciclo de cola, y por otro el programa de tareas del montaje y la puesta en marcha del propio ciclo de cola, así como su correspondiente duración.

Solo se mostrará de forma detallada las tareas, y sus respectivas duraciones, de las partes correspondientes al presente proyecto, es decir, la construcción y montaje de los conductos de gases de escape que forman el colector.

